Environment Canada
Environmental Protection Service

Environnement Canada
Service de la protection de l'environnement

ENVIRO

Technical

Information for

Problem

Spills

SULPHUR

March 1984

Canada

85-0077/

ENVIRONMENTAL AND TECHNICAL INFORMATION FOR PROBLEM SPILLS MANUALS

Environmental and Technical Information for Problem Spills (EnviroTIPS) manuals provide detailed information on chemical substances. This information is intended to assist the reader in designing countermeasures for spills and to assess their impact on the environment. The manual has been reviewed by the Technical Services Branch, Environmental Protection Service, and approved for publication. Approval does not necessarily signify that the contents reflect the views and policies of the Environmental Protection Service. Mention of trade names or commercial products does not constitute endorsement for use.

SULPHUR

ENVIRONMENTAL AND TECHNICAL INFORMATION FOR PROBLEM SPILLS

Technical Services Branch
Environmental Protection Programs Directorate
Environmental Protection Service
Ottawa, Ontario

March 1984

© Minister of Supply and Services Canada 1984
Cat. No. En 40-10/3-1984E
ISBN 0-662-13203-3
BEAUREGARD PRESS LIMITED

FOREWORD

The Environmental and Technical Information for Problem Spills (EnviroTIPS) manuals were initiated in 1981 to provide comprehensive information on chemicals that are spilled frequently in Canada. The manuals are intended to be used by spill specialists for designing countermeasures for spills and to assess their effects on the environment. The major focus of EnviroTIPS manuals is environmental. The manuals are not intended to be used by first-response personnel because of the length and technical content; a number of manuals intended for first-response use are available. The information presented in this manual was largely obtained from literature review. Efforts were made, both in compilation and in review, to ensure that the information is as correct as possible. Publication of these data does not signify that they are recommended by the Government of Canada, nor any other group.

ACKNOWLEDGEMENTS

The final version of this manual was prepared by the staff of the Environmental Protection Service who rewrote the text, drafted illustrations and incorporated all comments and additions.

The draft of this manual was prepared under contract to Environment Canada by M.M. Dillon Consulting Engineers and Planners, Concord Scientific Corporation, and Waterloo Engineering Limited. The level of detail present was made possible by the many individuals, organizations and associations who provided technical data and comments throughout the compilation and subsequent review. The Sulphur Development Institute of Canada (SUDIC) is especially acknowledged for its review and input to the manual.

TABLE OF CONTENTS

		Page
FOREWORD		i
ACKNOWLEDGEMENTS		i
LIST OF FIGURES		vi
LIST OF TABLES		vii
1	SUMMARY	1
2	PHYSICAL AND CHEMICAL DATA	4
3	COMMERCE AND PRODUCTION	11
3.1	Grades, Purities	11
3.2	Domestic Manufacturers	11
3.3	Major Transportation Routes	13
3.4	Production Levels	13
3.5	Manufacture of Sulphur	15
3.5.1	General	15
3.5.2	Raw Materials Occurrence and Extraction	15
3.5.3	Manufacturing Process	16
3.6	Major Uses in Canada	16
3.7	Major Buyers in Canada	17
4	MATERIAL HANDLING AND COMPATIBILITY	19
4.1	Containers and Transportation Vessels	19
4.1.1	Bulk Shipment	19
4.1.1.1	Railway cars	19
4.1.1.2	Motor vehicles	19
4.2	Off-loading	21
4.2.1	Off-loading Equipment and Procedures for Railway Tank Cars	21
4.2.2	Off-loading Equipment and Procedures for Tank Motor Vehicles	24
4.2.3	Specifications and Materials for Off-loading Equipment	26
4.3	Compatibility with Materials of Construction	27
5	CONTAMINANT TRANSPORT	32
5.1	General Summary	32
5.2	Leak Nomograms	32
5.2.1	Introduction	32
5.2.2	Nomograms	33
5.2.2.1	Figure 8: Percent remaining versus time	33
5.2.2.2	Figure 9: Discharge rate versus time	33
5.2.3	Sample Calculations	35
5.3	Dispersion in the Air	35

		Page
5.4	Behaviour with Water	35
5.5	Subsurface Behaviour: Penetration into Soil	35
6	ENVIRONMENTAL DATA	37
6.1	Suggested or Regulated Limits	37
6.1.1	Water	37
6.1.2	Air	37
6.2	Aquatic Toxicology	37
6.2.1	U.S. Toxicity Rating	37
6.2.2	Measured Toxicities	37
6.2.2.1	Freshwater toxicology	37
6.2.3	Aquatic Studies	38
6.3	Toxicity to Other Biota	38
6.3.1	Livestock	38
6.3.2	Plants	39
6.3.3	Insects	39
6.3.4	General - Animal and Plant Life	39
6.4	Other Air and Land Toxicity	40
6.5	Degradation	40
6.5.1	Aquatic Environment	40
6.5.2	Persistence in the Environment	40
6.6	Long-term Fate and Effects	40
6.7	Soil	40
6.7.1	Soil Degradation of Material	40
6.7.2	Effects on Soil Biota	41
7	HUMAN HEALTH	42
7.1	Recommended Exposure Limits	42
7.2	Irritation Data	42
7.2.1	Skin Contact	42
7.2.2	Eye Contact	42
7.3	Threshold Perception Properties	43
7.4	Long-term Studies	43
7.4.1	Inhalation	43
7.4.2	Ingestion	43
7.5	Symptoms of Exposure	43
7.5.1	Inhalation	43
7.5.2	Ingestion	43
7.5.3	Skin Contact	43
7.5.4	Eye Contact	43
7.6	Human Toxicity to Decay or Combustion Products	43
7.6.1	Hydrogen Sulphide and Sulphur Dioxide	44
8	CHEMICAL COMPATIBILITY	45
8.1	Compatibility of Sulphur with Other Chemicals and Chemical Groups	45

		Page
9	COUNTERMEASURES	53
9.1	Recommended Handling Procedures	53
9.1.1	Fire/Explosion Concerns	53
9.1.2	Fire Extinguishing Agents	53
9.1.3	Spill Actions	53
9.1.3.1	General	53
9.1.3.2	Spills on land	53
9.1.3.3	Spills in water	54
9.1.4	Cleanup and Treatment	54
9.1.4.1	Spills in water	54
9.1.5	Disposal	54
9.1.6	Protective Measures	54
9.1.7	Special Precautions	55
10	PREVIOUS SPILL EXPERIENCE	56
10.1	Train Derailment	56
11	ANALYTICAL METHODS	57
11.1	Detection of Sulphur in Air, Water and Soil	57
11.2	Quantitative Method for the Detection of Sulphur in Soil or Sediments	57
12	REFERENCES AND BIBLIOGRAPHY	59
12.1	References	59
12.2	Bibliography	64

LIST OF FIGURES

Figure		Page
1	LIQUID DENSITY vs TEMPERATURE	9
2	LIQUID VISCOSITY vs TEMPERATURE	9
3	PHASE DIAGRAM	10
4	TYPICAL GONDOLA FOR SULPHUR TRANSPORT	20
5	RAILWAY TANK CAR - CLASS111 A100W1	22
6	TANK CAR UNLOADING	25
7	TANK CAR WITH PUNCTURE HOLE IN BOTTOM	33
8	PERCENT REMAINING VS TIME	34
9	DISCHARGE RATE VS TIME	34

LIST OF TABLES

Table		Page
1	CONVERSION NOMOGRAMS	8
2	TYPICAL SPECIFICATIONS FOR SULPHUR GONDOLA	21
3	TYPICAL RAILWAY TANK CAR SPECIFICATIONS - CLASS 111A100W1	23
4	COMPATIBILITY WITH MATERIALS OF CONSTRUCTION	27
5	MATERIALS OF CONSTRUCTION	31

1 SUMMARY

SULPHUR (S_8)

Solid: yellow powder, slates, granules, lumps, prills

Molten: yellow to orange-red/brown liquid (temperature dependent)

SYNONYMS

Bensulfoid, Colloidal-S, Colsul, Crystex, Brimstone, Flowers of Sulphur, Sulfur

IDENTIFICATION NUMBERS

UN No. 1350 (solid), 2448 (molten); CAS No. 7704-34-9; OHM-TADS No. 7216913

GRADES & PURITIES

Grades: technical, crude, refined - high purity

IMMEDIATE CONCERNS

Fire: Combustible. Produces toxic sulphur dioxide gas during combustion. Dust may explode if there is an ignition source. May react violently in contact with oxidizing agents or powdered metals. Fire hazard is increased if hydrogen sulphide is present

Human Health: Elemental suplhur is virtually nontoxic. Burning sulphur produces a toxic gas (sulphur dioxide). Crude molten sulphur may evolve hydrogen sulphide due to the presence and decomposition of mercaptans

Environment: May be harmful to aquatic life in high concentrations as a suspended solid

PHYSICAL PROPERTY DATA

State (15°C, 1 atm): solid
Boiling Point: 444.6°C
Melting Point: 112.8 to 120°C
Flammability: combustible
Flash Point: 168-261°C

Behaviour (in water): generally sinks in water; powder may tend to float
Odour Threshold: pure sulphur is odourless; commercial farms may smell of hydrogen sulphide

Specific Gravity (water=1): 1.79 (138°C) (liquid), 2.07 (20°C) (molten)
Solubility: insoluble in water

ENVIRONMENTAL CONCERNS

Elemental sulphur may pose a serious hazard in high concentrations especially in celloidal form. Covering of the bottoms of water bodies may also cause problems. Molten sulphur will solidify, sink to the bottom and similarly pose a threat to bottom life.

There is no potential for accumulation or food chain concentration. Elemental sulphur will undergo slow oxidation in water, generating acidic conditions (probably a mixture of sulphurous and sulphuric acids).

HUMAN HEALTH

Exposure Effects

Inhalation: Sulphur dust can irritate the mucous membranes of the respiratory tract and the inner surfaces of the eyelid

Contact: Skin irritation may result from repeated exposures to sulphur dust. If spilled on clothing and allowed to remain, it may cause smarting and reddening of the skin. Molten sulphur can cause serious burns

Ingestion: Sulphur is nontoxic. Pharmaceutical sulphur has been used internally as a laxative and parasiticide

IMMEDIATE ACTION

Spill Control

Restrict access to spill site. Issue warning: "COMBUSTIBLE". Call fire department and notify supplier. Stop flow and contain spill, if safe to do so. Avoid contact and inhalation of dust.

Fire Control

Use water spray, dry chemical, foam or sand to extinguish. Avoid straight streams of water which will scatter molten sulphur and dust.

COUNTERMEASURES

Emergency Control Procedures in/on:

Soil: Construct barriers to contain spill if molten or solid. Dust can be controlled by keeping oxygen surface wet. Shovel solid sulphur into containers with covers for recovery or disposal. If sulphur is wet, some lime should be added to react with any acid formed by reaction with water or impurities. Let molten sulphur solidify and shovel into containers with covers when cool. Dampen area with water spray and cover with limestone. Pick up for recovery.

Water: Contain discharge by damming or water diversion. Remove solidified material and precipitate from bottom, with suction hoses or mechanical dredges.

NAS HAZARD RATING (MOLTEN)

Category	Rating
Fire	1-3
Health	
Vapour Irritant	1
Liquid or Solid Irritant	1
Poison	1
Water Pollution	
Human Toxicity	0
Aquatic Toxicity	1
Aesthetic Effect	1
Reactivity	
Other Chemicals	4
Water	0
Self-reaction	0

NFPA HAZARD CLASSIFICATION (SOLID)

Non-Fire

Fire

2 PHYSICAL AND CHEMICAL DATA

Physical State Properties

Appearance	Solid: yellow powder, granules, lumps, prills Molten: yellow to orange-red/brown liquid
Usual shipping states	Solid α: rhombic crystal (predominant form); liquid molten sulphur maintained between 149 and 154°C (Ashland MSDS; CE 1978)
Physical state at 15°C, 1 atm	Solid in rhombic or monoclinic crystal or amorphous form (CRC 1980; Kirk-Othmer 1979)
Melting point	general range: 110-119°C (Meyer 1977) α: 112.8°C (CRC 1980) β: 119.0°C (CRC 1980) γ: 106.8°C (Cotton 1972)
Freezing point	115°C (MCA 1959)
Boiling point	444.6°C (CRC 1980)

Densities

Density	Liquid: 1,790 kg/m^3 (138°C) (MCA 1959)
Bulk density:	Prills: 1,090-1,200 kg/m^3 (SUDIC 1983) Solid: 1,201-1,394 kg/m^3 (form not stated) (MCA 1959)
Specific gravity	α: 2.07 (20°C) (CRC 1980) β: 1.96 (20°C) (CRC 1980) γ: 1.92 (20°C) (CRC 1980) Liquid: 1.79 (138°C) (MCA 1959)

Fire Properties

Flammability	Combustible (all states). Forms ignitable/explosive mixtures with air (powdered/dispersed) 248-261°C (CE 1978) 168-188°C (Meyer 1977)
Flash point	207°C (NFPA 1978) 188°C (MCA 1959)
Ignition temperature in air (liquid)	248-261°C (Meyer 1977) 190°C (dispersed in air) (MCA 1959; Meyer 1977) 220°C (undispersed) (Meyer 1977)
Autoigniton temperature (solid)	232°C (NFPA 1978)

Upper explosive limit	1,400 g/m^3 (MCA 1959); as dust in air (Meyer 1979) 2,000 g/m^3 (Orchard 1982)
Lower explosive limit	35 g/m^3 (MCA 1959); as dust (Ashland MSDS) 25.1 g/m^3 (Meyer 1977)
Burning characteristics	Burns with a pale blue flame (CHRIS 1978)
Heat of combustion (solid)	-9,254 kJ/kg (Meyer 1977) -9,378 kJ/kg (monoclinic) (CRC 1982) -9,211 kJ/kg (rhombic) (CRC 1982)
Combustion products	Sulphur dioxide
Explosiveness	Dust or vapour forms explosive mixtures with air (NFPA 1978)
Other Properties	
Atomic weight	32.06 (CRC 1982)
Molecular weight of pure substance (S_8)	265.512 (CRC 1980)
Usual purity	>99.9 percent sulphur (molten or liquid) (SUDIC 1983)
Resistivity	1.9 x 10^{17} ohm•cm (20°C) (Kirk-Othmer 1979)
Refractive index	α: 1.957 (CRC 1980) β: 2.038 (CRC 1957)
Viscosity (liquid sulphur)	11 mPa•s (123°C) (CRC 1982) 23 mPa•s (160°C) (CRC 1982)
Liquid interfacial tension with air	0.061 N/m (liquid at 120°C) (Kirk-Othmer 1979)
Liquid interfacial tension with water	0.05 N/m (liquid at 127°C) (CHRIS 1978)
Latent heat of fusion	α: 49.8 J/g (112.8°C) (Kirk-Othmer 1979) S: 38.5 J/g (118.9°C) (monoatomic sulphur) (CRC 1982)
Latent heat of vaporization	290 J/g (440°C) (Kirk-Othmer 1979)
Heat of formation	S-Monoclinic: 0.33 kJ/mole (25°C) (NBS 1982) S-gas: 278.8 kJ/mole (25°C) (NBS 1982) S_8-gas: 102.3 kJ/mole (25°C) (NBS 1982)
Ionization potential (as S_8^+)	9.04 eV (Rosenstock 1977)
Heat capacity constant pressure (C_p)	961.5 J/kg•K (molten at 120°C) (Kirk-Othmer 1979) 310.5 J/kg•K (S_α at 24.9°C) (Kirk-Othmer 1979)

constant volume (C_v)	98.6 J/mole (est.) (JANAF 1971; CHRIS 1978)
Critical temperature	1,040°C (Kirk-Othmer 1979)
Critical pressure	11,750 kPa (Kirk-Othmer 1979)
Coefficient of thermal expansion (linear)	7.4×10^{-5}/°C (from 13°C to 50°C) (rhombic) (Kirk-Othmer 1979)
Coefficient of cubical expansion	2.23×10^{-4}/°C (13.2-50.3°C) (CRC 1957)
Thermal conductivity	2.7×10^{-3} W• cm^{-1}•K^{-1} (25°C) (solid - polycrystalline) (CRC 1982) 2.05×10^{-3} W•cm^{-1}•K^{-1} (25°C) (solid and amorphous) (CRC 1982) 1.29×10^{-3} W•cm^{-1}•K^{-1} (100°C) (liquid) (CRC 1982)

Solubility

In water	Insoluble (Kirk-Othmer 1979)
In other common materials	(α): Soluble in carbon disulphide and carbon tetrachloride; slightly soluble in toluene, alcohol, benzene, ether and liquid ammonia (CRC 1982)

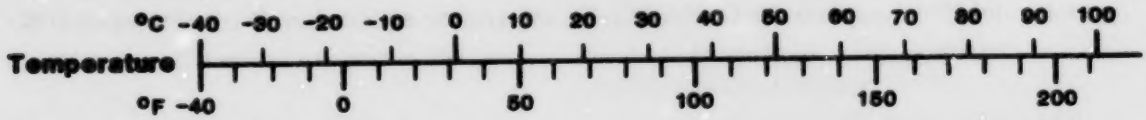
Structural Properties

Because the structural relationships of sulphur in all three phases are exceedingly complex, a brief summary is thought to be pertinent and is presented in this section. All modifications of solid sulphur contain rings or chains of sulphur atoms. The most common form, cyclooctasulphur (S_8), has three main allotropes (crystal forms). Rhombic (orthorhombic) sulphur, S_α, is thermodynamically the most stable form. It melts at 112.8°C. Rhombic sulphur transforms slowly to monoclinic sulphur, S_β, at 95.5°C. The latter form melts at 119°C; however, because the transformation is slow, rapid heating will produce the melting point of the more stable allotrope. Monoclinic sulphur slowly converts back to rhombic sulphur at normal conditions. Other monoclinic forms have been identified microscopically, but must be obtained by special procedures. One such form is S_γ which melts at 106.8°C and slowly transforms back into S_β and/or S_α. Other cyclic sulphur with more or less sulphur atoms can be prepared, but all are unstable at normal conditions. A plastic sulphur, thought to contain helical chains of sulphur atoms, can be obtained by pouring molten sulphur into ice water. The plastic mass will slowly transform to S_α. Cyclooctasulphur is a yellow, transparent, mobile liquid upon melting which becomes brown and increasingly viscous above 160°C. The viscosity increases until the temperature reaches about 200°C, then decreases to the boiling point, 444.60°C. At this

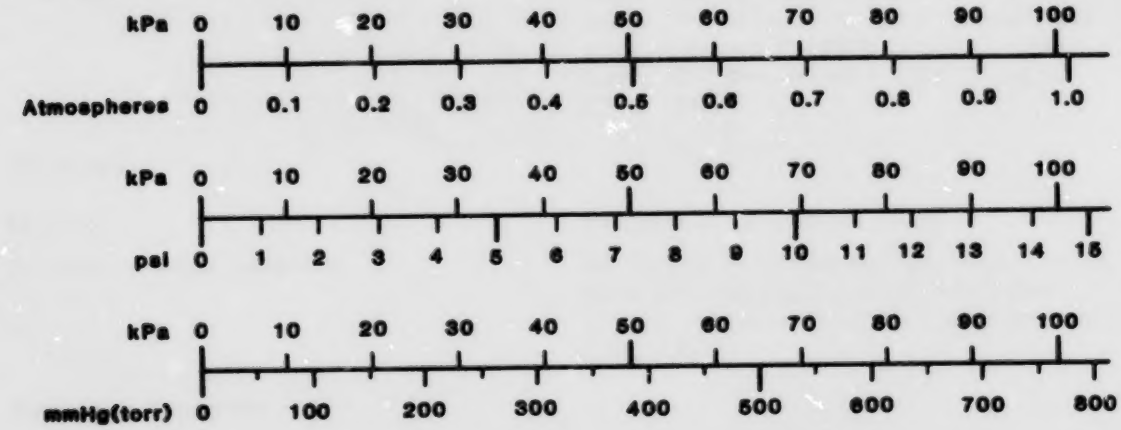
point, the sulphur is a mobile, dark red liquid. The changes in the viscosity and the colour are due primarily to ring cleavage and chain formation. Sulphur vapour contains not only S_8 molecules, but S_n species in a temperature-dependent equilibrium (Kirk-Othmer 1979).

TABLE 1

CONVERSION NOMOGRAMS



Pressure 1 kPa = 1,000 Pa



Viscosity

Dynamic 1 Pa-s = 1,000 centipoise (cP)

Kinematic 1 m^2/s = 1,000,000 centistokes (cSt)

Concentration (in water)

1 ppm ≅ 1 mg/L

Energy (heat) 1 kJ = 1,000 J

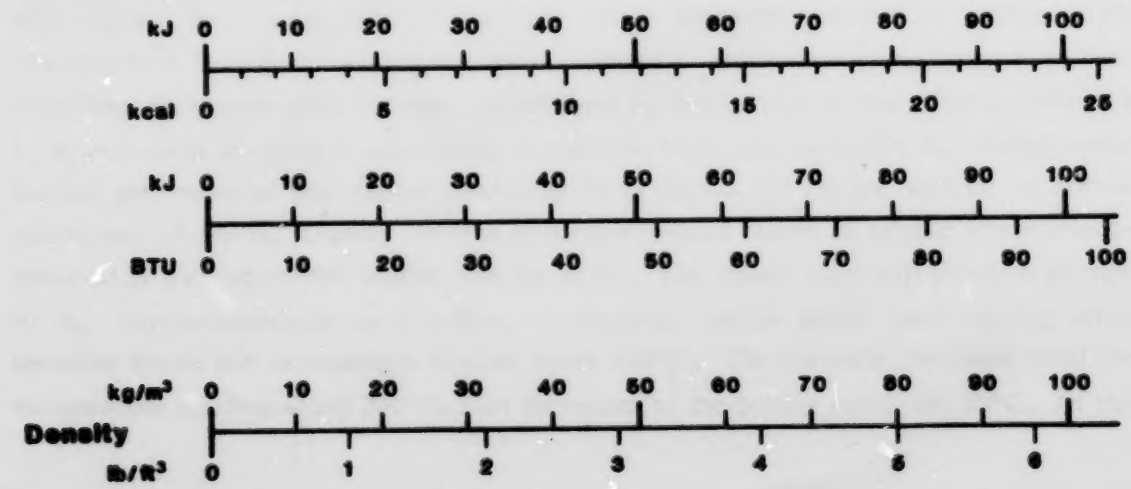


FIGURE 1

SULPHUR

LIQUID DENSITY vs TEMPERATURE

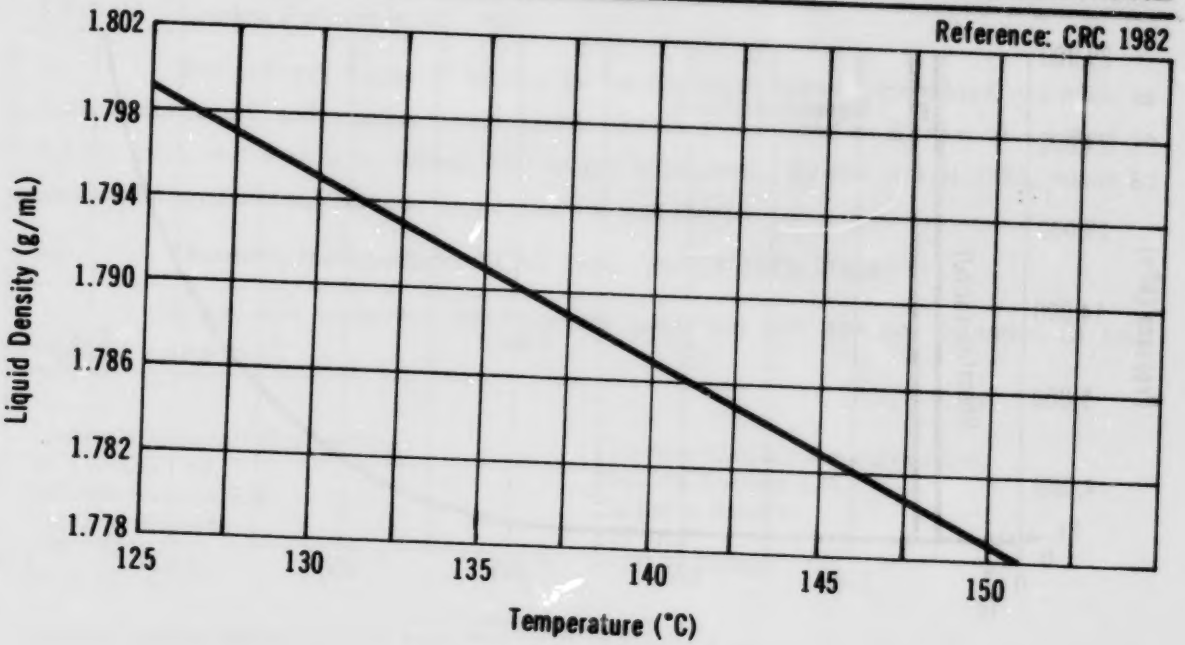


FIGURE 2

SULPHUR

LIQUID VISCOSITY vs TEMPERATURE

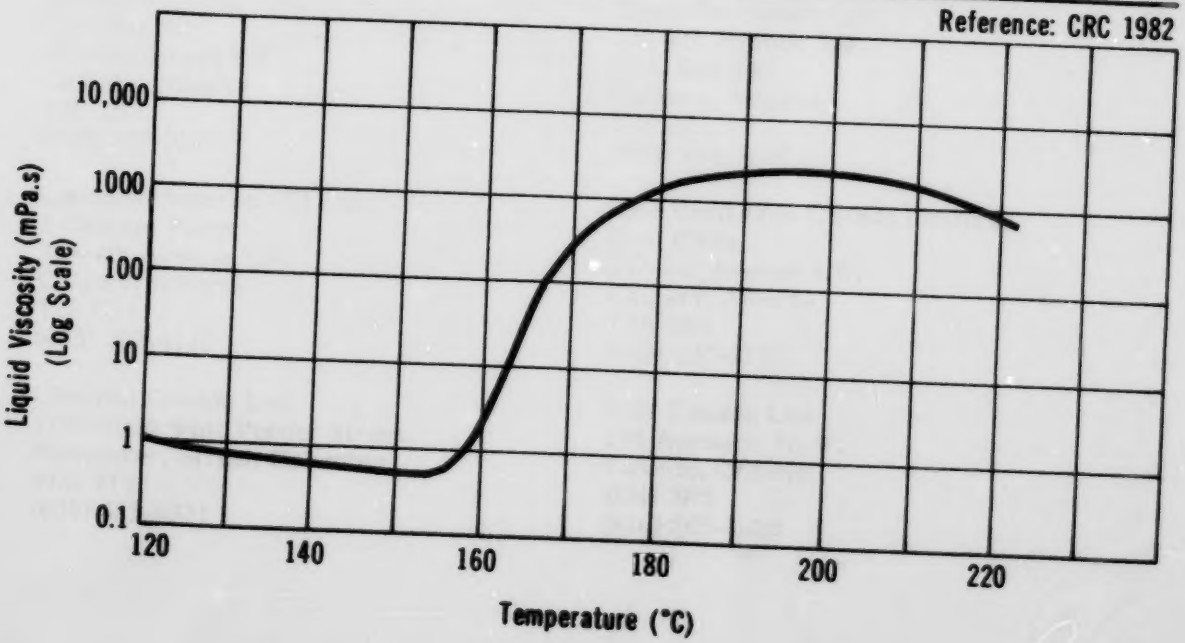
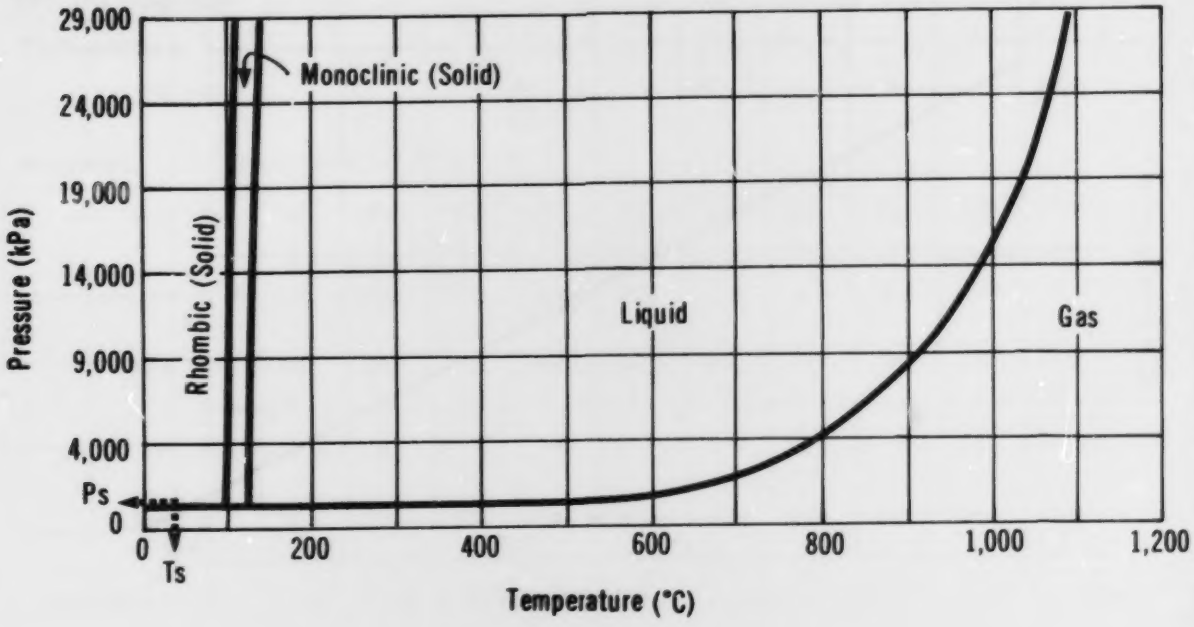


FIGURE 3

SULPHUR **PHASE DIAGRAM**



3 COMMERCE AND PRODUCTION

3.1 Grades, Purities (CMI 1980)

The primary forms of sulphur in the Canadian market are slates, granules, or prills (solid form), and molten (liquid form). Slates are defined as a layer about 0.64 to 1.3 cm thick and 3 to 6 cm wide. The length is random. By the end of 1981, about 60 percent of exported sulphur was in granular or prill form.

3.2 Domestic Manufacturers (CBG 1980; DNACP 1979; SUDIC 1983)

These are corporate headquarters addresses and are not intended as spill response contacts.

Amerada Minerals Corporation
of Canada Ltd.
540-5th Avenue S.W.
Calgary, Alberta
T2P OM3
(403) 267-4110

Amoco Canada Petroleum Co. Ltd.
444-7th Avenue S.W.
Calgary, Alberta
T2P OY2
(403) 233-1313

Canterra Energy Ltd.
P.O. Box 1051
505-5th Street S.W.
Calgary, Alberta
T2P 2K7
(403) 267-9111

Canadian Superior Oil Ltd.
3 Calgary Place
355-4th Avenue S.W.
Calgary, Alberta
T2P 0J3
(403) 267-4110

Chevron Canada Ltd.
1500-1050 West Pender Street
Vancouver, British Columbia
V6C 3T4
(604) 681-4271

Chevron Canada Resources Ltd.
500-5th Avenue S.W.
Calgary, Alberta
T2P 0L7
(403) 262-0500

Cominco Limited
200 Granville Street
Vancouver, British Columbia
V6C 2R2
(604) 682-0611

Dome Petroleum Ltd.
330-7th Avenue S.W.
P.O. Box 200
Calgary, Alberta
T2P 2Z1
(403) 260-5100

Esso Resources Canada Limited
Esso Plaza
237-4th Avenue S.W.
Calgary, Alberta
T2A 0H6
(403) 237-3737

Gulf Canada Ltd.
130 Adelaide St. W.
Toronto, Ontario
M5H 3P5
(416) 869-8600

Home Oil Co. Limited
2300 Home Oil Tower
324-8th Avenue S.W.
Calgary, Alberta
T2P 2Z5
(403) 232-7100

Husky Oil Ltd.
505-5th Street S.W., 19th Floor
P.O. Box 6525, Station "D"
Calgary, Alberta
T2P 3G7
(403) 267-6111

Imperial Oil Ltd.
111 St. Clair Avenue West
Toronto, Ontario
M5W 1K3
(416) 968-4111

Inco Metals
Inco Ltd.
1 First Canadian Place
P.O. Box 44
Toronto, Ontario
M5X 1C4(403) 234-6700
(416) 361-7511

Irving Oil Ltd.
Refining Division
P.O. Box 1260
Saint John, New Brunswick
E2L 4H6
(506) 652-7710

Maynard Exploration Company
2319 Sun Oil Bldg.
T2P 2V6
(403) 269-4993
Calgary, Alberta

Mobil Oil Canada Ltd.
Mobil Tower
330-5th Avenue S.W.
P.O. Box 800
Calgary, Alberta
T2P 2J7
(403) 268-7910

Norcen Energy Resources Ltd.
4600 Toronto Dominion Centre
Toronto, Ontario
M3K 1E5
(416) 866-4000

Pan Canadian Petroleum
Pan Canadian Plaza
150-9th Avenue S.W.
P.O. Box 2850
Calgary, Alberta
T2P 2S5
(403) 290-2000

Petro-Canada
P.O. Box 2844
Calgary, Alberta
T2P 2M7
(403) 296-8000

Petrogas Processing Ltd.
1600 McFarland Towers
700-4th Avenue S.W.
Calgary, Alberta
T2P 3J5

Saratoga Processing Co. Ltd.
1212 Palliser Square East
125-9th Avenue S.E.
Calgary, Alberta
T2G 0P6
(403) 262-4561

Shell Canada Ltd.
505 University Avenue
Toronto, Ontario
M5G 1X4
(416) 597-7111

Sulconam Inc.
11450 Cherrier
Montreal East, Quebec
H1B 1A6
(514) 645-1636

Sulpetro of Canada Ltd.
3200 Bow Valley Square
255-5th Avenue S.W.
Calgary, Alberta
T2P 3G6
(403) 232-1500

Suncor Inc.
Sunoco Group Offices
56 Wellesley Street West
Toronto, Ontario
M5S 2S4
(416) 924-4111

Suncrude Canada Ltd.
10030-107 Street
Edmonton, Alberta
T5J 3E5
(403) 429-9110

Texaco Canada Inc.
90 Wynford Drive
Don Mills, Ontario
M3C 1K4
(416) 443-7811

Westcoast Transmission Co. Ltd.
1333 West Georgia Street
Vancouver, British Columbia
V6E 3K9
(604) 682-4411

Western Decalta Petroleum (1977)
Limited
P.O. Box 2404, 9th Floor
734-7th Avenue S.W.
Calgary, Alberta
T2P 2M7
(403) 294-5566

3.3 Major Transportation Routes

Canadian production and/or utilization of elemental sulphur are widespread, occurring in nine of the ten provinces. Alberta accounts for 90 percent of the total production, with facilities located throughout the province. Both solid and molten forms are shipped to destinations in North America by rail and truck. Molten sulphur is not shipped to offshore markets. Offshore shipments of formed sulphur (prills, slates or granules) occur through the ports of Vancouver and Prince Rupert, B.C., and Thunder Bay, Ontario. Generally, the sulphur reaches these ports by rail. The Canadian market for elemental sulphur totals around 850,000 tonnes per year, half of which remain in Alberta for the manufacture of fertilizer. Transport of molten sulphur by truck is only significant within Alberta in the fertilizer manufacturing industry.

3.4 Production Levels (Corpus 1983)

Company, Plant Location	Nameplate Capacity kilotonnes/yr (1982)
Amerada Mineral, Olds, Alta.	140
Amoco, East Crossfield, Alta.	640
Amoco, Bigstone Creek, Alta.	140

Company, Plant Location	Nameplate Capacity kilotonnes/yr (1982)
Amoco, Canterra, Windfall, Alta.	430
Canadian Occidental Petroleum, Paddle River, Alta.	7.1
Canadian Superior Oil, Harmattan, Alta.	180
Canadian Superior Oil, Lone Pine Creek, Alta.	57
Canterra Energy, Rainbow Lake, Alta.	50
Canterra Energy, Ram River, Alta.	1 670
Canterra Energy, Okotoks, Alta.	167.5
CDC Oil & Gas, Brazeau River, Alta.	15.5
Chevron Canada, Burnaby, B.C.	3.5
Chevron Development, Sinclair, Alta.	90
Chevron Standard, Kaybob, Alta.	1 285
Chevron Standard, Nevis, Alta.	95
Cominco, Trail, B.C.	40
Consumers Corp. REF., Regina, Sask.	7.2
Dome Petroleum, Brazeau River, Alta.	40.2
Dome Petroleum, Caroline, Alta.	8
Dome Petroleum, Edson, Alta.	103.5
Dome Petroleum, Kaybob South I, Alta.	388
Dome Petroleum, Kaybob South II, Alta.	388
Dome Petroleum, Lone Pine Creek, Alta.	103
Dome Petroleum, Sturgeon Lake S., Alta.	27
Esso Resources, Joffre, Alta.	6.2
Esso Resources, Quirk Creek, Alta.	109.5
Esso Resources, Redwater, Alta.	12
Gulf Canada, Clarkson, Ont.	15
Gulf Canada, Edmonton, Alta.	37.5
Gulf Canada, Hanlan-Robb, Alta.	251
Gulf Canada, Nevis, Alta.	108.5
Gulf Canada, Pincher Creek, Alta.	58.5
Gulf Canada, Port Moody, B.C.	9
Gulf Canada, Rimbey, Alta.	121.5
Gulf Canada, Strachan, Alta.	344
Home Oil, Carstairs, Alta.	26.5
Hudson's Bay Oil & Gas, Zama, Alta.	27
Husky Oil, Prince George, B.C.	2
Imperial Oil, Edmonton, Alta.	13
Imperial Oil, Ioco, B.C.	6.5
Imperial Oil, Sarnia, Ont.	40
Imperial Oil, Dartmouth, N.S.	26
Inco Metals, Thompson, Man.	30
Irving Refining, Saint John, N.B.	73
Mobil Oil Canada, Teepee Creek, Alta.	11
Mobil Oil Canada, Wimborne, Alta.	63.5
Pan Canadian Petroleum, Morley, Alta.	6.5
Petro-Canada, Gold Creek, Alta.	15.5
Petro-Canada, Wildcat Hills, Alta.	64.5

Company, Plant Location	Nameplate Capacity kilotonnes/yr (1982)
Petrogas Processing, Crossfield, Alta.	615
Saratoga Processing, Coleman, Alta.	142
Shell Canada, Burnt Timber Cr., Alta.	181.5
Shell Canada, Corunna, Ont.	12.5
Shell Canada, Burnaby, B.C.	5.5
Shell Canada, Innisfail, Alta.	59.5
Shell Canada, Jumping Pound, Alta.	186.5
Shell Canada, Oakville, Ont.	18
Shell Canada, Simonette River, Alta.	97.5
Shell Canada, Waterton, Alta.	1 120
Shell Canada, South Rosevear, Alta.	62.5
Steelman Gas, Steelman, Sask.	2.5
Sulconam Inc., Montreal East, Que.	110
Sulpetro, Minnehik-Buck L., Alta.	16.5
Suncor, Black Diamond, Alta.	4.5
Suncor, Fort McMurray, Alta.	100
Suncor, Rosevear, Alta.	30.5
Suncor, Sarnia, Ont.	4.5
Syncrude, Mildred Lake, Alta.	181.5
Texaco Canada, Bonnie Glen, Alta.	4.5
Texaco Canada, Nanticoke, Ont.	12.5
Westcoast Trans, Fort Nelson, B.C.	400
Westcoast Trans, Pine River, B.C.	385
Westcoast Trans, Taylor Flats, B.C.	118.5
Western Decalta, Turner Valley, Alta.	9
TOTAL	11 458.2
Domestic Production (1982)	6 673
Imports (1982)	2
TOTAL SUPPLY	6 675

3.5 Manufacture of Sulphur (Shreve 1977; CMI 1980)

3.5.1 General. In Canada, sulphur is obtained from three sources. The primary source of elemental sulphur is from sour natural gas (containing hydrogen sulphide), with smaller amounts from sour petroleum. Other sources include sulphuric acid and sulphur dioxide recovered from smelter gases, and sulphuric acid from pyrite concentrates and minor amounts from direct mining operations.

3.5.2 Raw Materials Occurrence and Extraction. The hydrogen sulphide dissolved in natural gas is extracted by absorption into a solution of either diethanolamine, monoethanolamine, hot potassium carbonate or sulfinol (a mixture of water, an alkanolamine - usually diisopropanolamine - and sulfolane-tetrahydrothiophene dioxide).

The solution is then heated in a stripper tower where the dissolved gas is evolved. Considerable care is taken to ensure that hydrocarbon dissolution in the treating agent is avoided.

3.5.3 Manufacturing Process. The hydrogen sulphide is then burned with sufficient air to oxidize one-third of the hydrogen sulphide to sulphur dioxide; or, in some operations, sulphur dioxide, made by burning sulphur, is added to achieve a two-to-one hydrogen sulphide-to-sulphur dioxide ratio. This mixture is passed over an alumina-based catalyst in a "Claus reactor" or other reactors. The following equations are representative of the transformations occurring in reactors:

$$H_2S + \frac{3}{2} O_2 \longrightarrow H_2O + SO_2$$

$$2H_2S + SO_2 \longrightarrow 2H_2O + \frac{3}{x} S_x \text{ (vapour)}$$

A key variable in this reaction is the ratio of sulphur dioxide to hydrogen sulphide. This must be controlled within close limits for good yields of sulphur. (Precision may be achieved by computer-linked spectrophotometric analysis and feed control systems.) Passing the reaction mixture through another, lower temperature, reactor shifts the equilibrium to more complete conversion to sulphur. Similar reactors may be used at progressively lower temperatures to reduce the amounts of unreacted sulphur compounds to acceptable levels prior to final discharge of effluent gases to the atmosphere.

Gas from the reactor enters a condenser-converter series; liquid sulphur is removed in each unit until 95 percent or more of the original sulphur has been drawn off. The molten sulphur can be transported as a liquid or processed to form slates, granules and prills. The latter two forms are generated by water quenching and air quenching sprays of molten sulphur, respectively. The air is blown up through towers to quench counter-current sprays of the molten class product. Water quenching produces relatively lumpy granules in a large range of sizes, while air quenching produces dimpled spheroids of fairly consistent size.

3.6 Major Uses in Canada (CMI 1980)

Consumption of sulphur in 1979 and 1980 was in excess of 1.7 million tonnes, with about half of the tonnage (counted as sulphur equivalent) derived from smelter gases. Three-quarters of this total consumption was in the form of sulphuric acid at some stage.

It is safe to say that the major use of sulphur in Canada is in the production of sulphuric acid. The second largest consumer is the pulp and paper industry. Other industries using significant quantities of sulphur or sulphuric acid are uranium ore processing, metal recovery, petroleum refining, plastics, rubber products, soaps, and food.

3.7 Major Buyers in Canada (Corpus 1981; CBG 1980)

Abitibi-Price, Iroquois Falls, Thorold, Thunder Bay, Ont.; Kenogami, Que.; Grand Falls, Nfld.
BC Forest Products, Crofton, Mackenzie, B.C.
Boise Cascade, Kenora, Ont.
Border Chemical, Transcona, Man.
Bowater Mersey, Brooklyn, N.S.
Bowater Newfoundland, Cornerbrook, Nfld.
Canada Colours, Toronto, Ont.
Canadian Cellulose, Castlegar, B.C.
Canadian Forest Products, Port Mellon, B.C.
Canadian International Paper, Hawkesbury, Ont.; Trois-Rivieres, Matane, Que.
Canadian Occidental Petroleum, Vancouver, B.C.
Cariboo Pulp, Quesnel, B.C.
Chemsolve, Willowdale, Ont.
Consolidated-Bathurst, Shawinigan, Grand'Mere, Port Alfred, Que.
Cornwall Chemicals, Cornwall, Ont.
Crestbrook Timber, Skookumchuck, B.C.
Domtar, Dolbeau, Donnacona, Que.
Donohue, Clermont, Que.
Esso Chemical Canada, Redwater, Alta.
Fraser, Edmundston, Atholville, N.B.
Gaspesia Pulp & Paper, Chandler, Que.
Great Lakes Forest, Thunder Bay, Ont.
Gulf Minerals, Rabbit Lake, Sask.
IMC, Port Maitland, Ont.
Inland Chemicals, Ft. Saskatchewan, Alta.
Kruger Pulp & Paper, Trois Rivieres, Que.
Lake Utopia Paper, St. George, N.B.
MacLaren James, Buckingham, Que.
MacMillan Bloedel, Harmac, Powell River, B.C.
NL Chem Canada, Varennes, Que.
Northwood Pulp, Prince George, B.C.
Nova Scotia Forest, Pt. Hawkesbury, N.S.
Ontario Paper, Thorold, Ont.
QNS Paper, Baie Comeau, Que.
Rayonier, Port Alice, B.C.
Reed, Quebec City, Que.
St. Lawrence Chemical, Montreal, Que.
St. Raymond Paper, Debiens, Que.
St. Regis Alberta, Hinton, Alta.
Sherritt Gordon Mines, Ft. Saskatchewan, Alta.
Spruce Falls Power, Kapuskasing, Ont.
Sulco Chemicals, Elmira, Ont.
Tahsis, Gold River, B.C.

Tembec Forest Products, Temiscaming, Que.
Thio-Pet Chemicals, Ft. Saskatchewan, Alta.
Van Waters & Rogers, Richmond, B.C.
Western Cooperative Fertilizer, Calgary, Alta.
Western Forest Products, Port Alice, B.C.

4 MATERIAL HANDLING AND COMPATIBILITY

4.1 Containers and Transportation Vessels

4.1.1 Bulk Shipment. Most sulphur is transported in open-topped gondola cars as bulk solid. Molten sulphur and solid bulk sulphur are shipped in specially designed railway tank cars and tank motor vehicles.

4.1.1.1 Railway cars. Solid sulphur is most commonly transported in open-topped gondola cars as illustrated in Figure 4 and detailed in Table 2. The capacity of the most commonly used gondola is 125 m^3 (4,400 cu. ft.) or 91 tonnes (100 tons) (ORER 1983). Railway tank cars used in the transportation of molten sulphur are not regulated by CTC or DOT. However, CTC/DOT 111A railway tank cars are generally used. The most commonly used car is a 50,500 L (11,000 Imp. gal.) capacity 111A100W1 tank car as illustrated in Figure 5 and detailed in Table 3.

Cars are equipped for unloading by pump, gravity flow, or air padding through one 102 mm (4 in.) diameter bottom outlet provided with a stainless steel ball valve (Shell 1982). This bottom discharge outlet is furnished with a steam jacket (Shell 1982). In addition to bottom unloading, the cars may be unloaded from the top by compressed air. In this case, the molten sulphur is withdrawn through an eduction pipe which extends from the bottom of the tank to the top operating platform where it terminates at a blind flange, usually 51 mm (2 in.) in size. Air pressure of 138 kPa (20 psi) is applied through the 25 mm (1 in.) air connection valve (MCA 1959). Outside heating coils and glass wool insulation are required. Constructed from 203 mm (8 in.) diameter type A53 grade B steel pipe in half-oval form, the heating coils are laid out in a serpentine configuration across the bottom third of the tank (TCM 1979).

A safety vent set at 517 kPa (75 psi) is required on top of the rail car. A gauging device, either the rod type or the tape type, is optional. The maximum pressure allowable for the 111A100W1 rail car is 448 kPa (65 psi). Molten sulphur is never transported under pressure.

4.1.1.2 Motor vehicles. Trucks are also used to transport sulphur. Open boxes are typically used to transport formed sulphur. Tank trucks are occasionally used to transport molten sulphur. Similar to railway tank cars, these highway tankers are unloaded through a bottom outlet provided with an inner plug valve (CMI 1980). When compressed air is used for unloading, the standpipe, usually extended down over the back of the tanker, is used (MCA 1959). Because tank trucks are used for hauling molten sulphur relatively

FIGURE 4

SULPHUR

TYPICAL GONDOLA FOR SULPHUR TRANSPORT

(Reference - CLC 1974, ORER 1983)

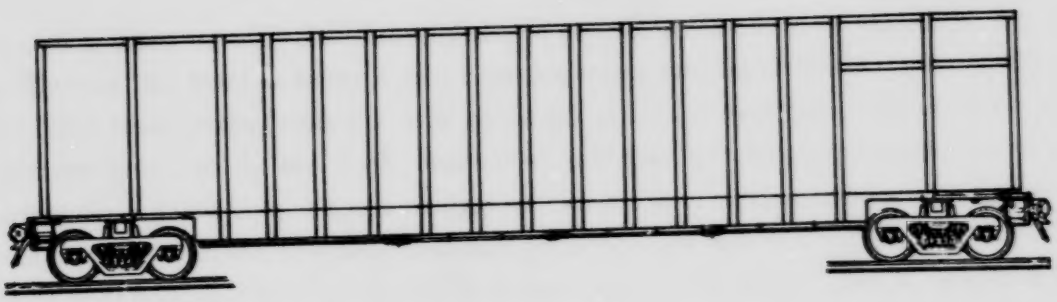


TABLE 2 TYPICAL SPECIFICATIONS FOR SULPHUR GONDOLA (CLC 1974; ORER 1983)

Description		
Overall		
Nominal capacity	125 m^3	(4,400 cu. ft.)
	91 tonnes	(100 tons)
Car weight - (max.)	94,800 kg	(209,000 lb.)
Gondola		
Outside length	17.9 m	(58 ft. 7 in.)
Outside width	3.25 m	(10 ft. 8 in.)
Outside height	3.76 m	(12 ft. 4 in.)
Inside length	14.6 m	(48 ft.)
Inside width	2.97 m	(9 ft. 9 in.)
Inside height	3.43 m	(11 ft. 3 in.)
Approximate Dimensions		
Coupled length	19 m	(63 ft.)
Length over strikers	18 m	(60 ft.)
Length of truck centers	15 m	(48 ft.)
Clearance height	5 m	(15 ft.)
Overall width	3 m	(11 ft.)

short distances, no steaming facilities are usually provided but insulation is required to keep heat losses to a minimum.

Molten sulphur is not transported under pressure. Highway tankers must be pressure tested at 207 kPa (30 psi) minimum to allow for the compressed air pressure of 138 kPa (20 psi) used during top unloading (MCA 1959).

4.2 Off-loading

The off-loading procedure for solid forms of sulphur from both rail and truck is by dumping and thus will not be described further in this section.

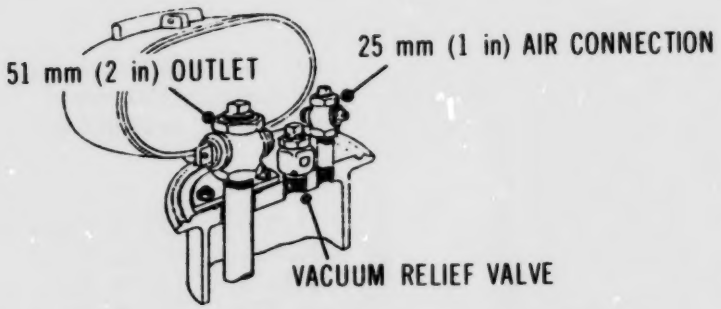
4.2.1 Off-loading Equipment and Procedures for Railway Tank Cars. P ior to off-loading, certain precautions must be taken (MCA 1959; Shell 1982; CCPA 1982):

- Ensure that receiving container has sufficient capacity to hold the contents of the tank car.
- For night-time unloading, lights must have an explosion-proof rating.
- Personnel must not enter the car under any circumstances.

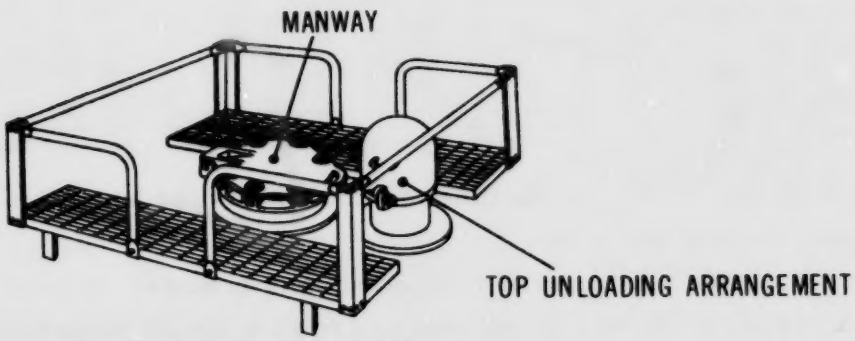
FIGURE 5

SULPHUR **RAILWAY TANK CAR - CLASS 111A100W1**

(Reference - TCM 1979, RTDCR 1979)



Detail of top unloading arrangement



Detail of loading platform

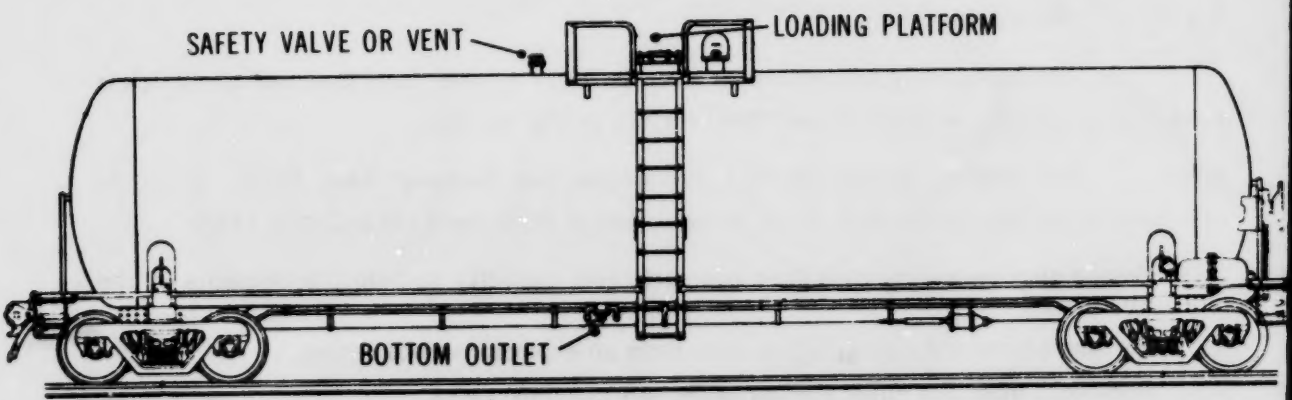


Illustration of tank car layout

TABLE 3 TYPICAL RAILWAY TANK CAR SPECIFICATIONS - CLASS 111A100W1 (TMC 1979; Shell 1982)

Description	
Overall	
Nominal capacity	50,500 L (11,000 Imp. gal.)
Car weight - empty	28,600 kg (63,000 lb.)
Car weight - (max.)	119,000 kg (263,000 lb.)
Tank	
Material	Steel
Thickness	11.1 mm (7/16 in.)
Inside diameter	2.38 m (94 in.)
Test pressure	689 kPa (100 psi)
Burst pressure	3,450 kPa (500 psi)
Approximate Dimensions	
Coupled length	14 m (45 ft.)
Length over strikers	13 m (43 ft.)
Length of truck centers	9 m (28 ft.)
Height to top of grating	3.7 m (12 ft.)
Overall height	4.3 m (14 ft.)
Overall width (over grabs)	3.2 m (127 in.)
Length of grating	2.4 m (8 ft.)
Width of grating	1.8 m (6 ft.)
Loading/Unloading Fixtures	
Top Connections	
Siphon tube connection	51 mm (2 in.)
Manway/fill hole	457 mm (18 in.)
Air connection	25 mm (1 in.)
Bottom Unloading	
Bottom outlet	102 mm (4 in.)
Nipple size	Steam jacketed 51 mm (2 in.)
Safety Devices	Safety vent set at 517 kPa (75 psi)
Dome	None
Insulation	152 mm (6 in.) glass wool

- Brakes must be set, wheels chocked, derails employed, car grounded, and caution placards displayed.
- Because of the possibility of hydrogen sulphide being present, breathing protection and a doctor should be available.
- A safe operating platform must be provided at the unloading point.

Two means of off-loading are used for molten sulphur rail cars - top off-loading and bottom off-loading. Both means are indicated in Figure 6.

Proceed with top off-loading as follows (MCA 1959; Shell 1982):

- Ascertain that any pressure buildup within the tank car has been released and that sulphur is completely molten.
- Connect the 51 mm (2 in.) heated unloading line to the discharge outlet.
- Connect the 25 mm (1 in.) air line. Air pressure must be increased to 448-517 kPa (65-75 psi) for unloading. A safety relief valve must be installed in the air line to release at 517 kPa.
- After opening the air supply valve, the unloading connection valve can then be opened to unload the car.
- Once the car is empty, the air supply valve must be closed and the vent valve in the air line opened to allow the line pressure to equalize to atmospheric pressure. Gauge should indicate 101 kPa (14.6 psi).
- Reverse the above procedure to close up the car.

Proceed with bottom off-loading in the following manner using gravity flow, air, or pumping (MCA 1959; Shell 1982):

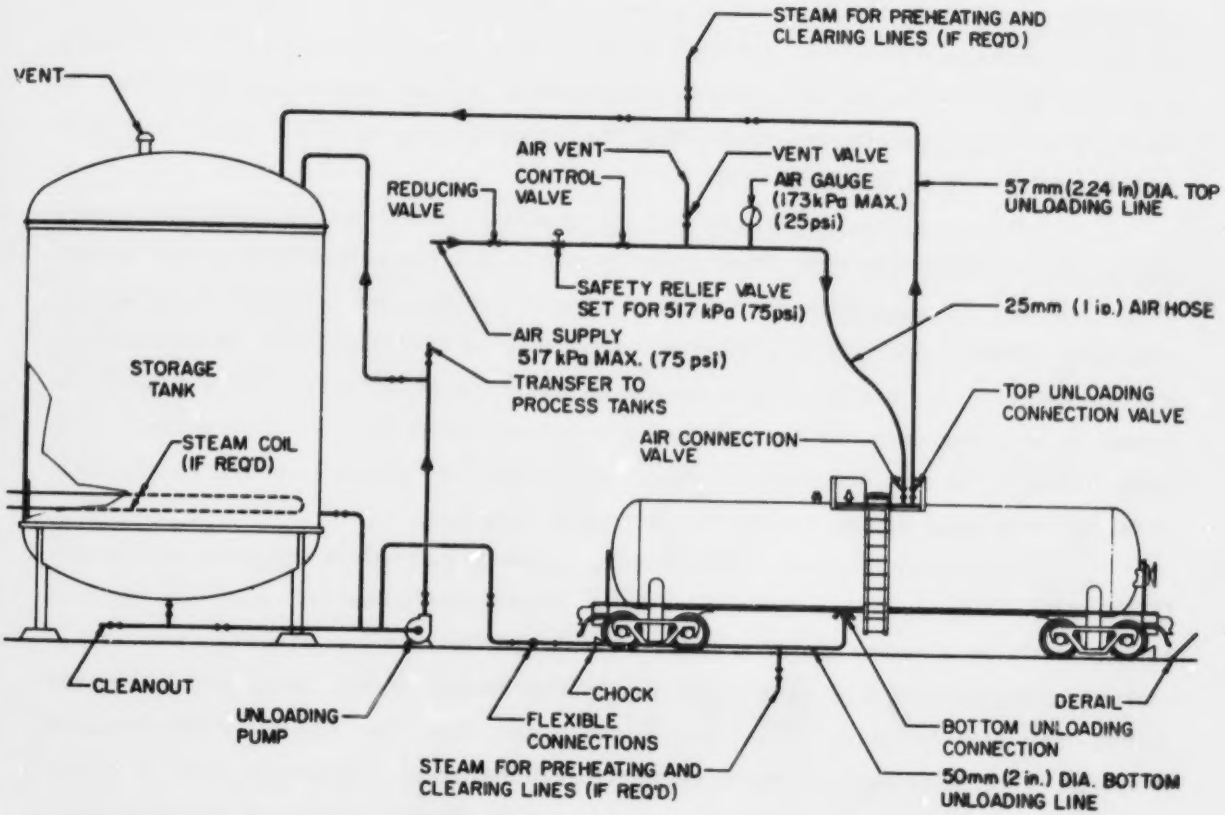
- Ascertain that any pressure buildup within the car has been released and that sulphur is completely molten.
- In cold weather, apply steam to the bottom unloading connection. Steam coil connection valves (Figure 6) should also be connected to live steam. The steam is regulated to achieve a pressure of 483 kPa (70 psi) to warm the sulphur to 132°C (12 to 20 hours). Before unloading, reduce steam pressure to 276 kPa (40 psi).
- After connecting the unloading line to the 51 mm (2 in.) bottom outlet, open the inside bottom valve by turning the valve rod handle at the top of the car.
- Off-load the car by gravity, air, or pump. The same air pressure precautions must be taken as with top unloading.
- Reverse the above procedure to close up the car.

4.2.2 Off-loading Equipment and Procedures for Tank Motor Vehicles. The unloading of molten sulphur tank trailers is similar to that of tank cars, with the exception that no facilities for steaming are usually provided. The general procedures for tank cars apply equally well to tank trailers.

FIGURE 6

SULPHUR

TANK CAR UNLOADING



NOTE:

1. FOR TOP OR BOTTOM UNLOADING METHOD SEE TEXT.

4.2.3 Specifications and Materials for Off-loading Equipment. The materials of construction for off-loading system components discussed in this section along with specifications refer to those generally used in molten sulphur service. It is recognized that other materials may be used for the handling of solid sulphur and for particular applications with molten sulphur. The components of a typical off-loading system include pipes and fittings, flexible connections, valves, gaskets, pumps and storage tanks.

Steel is a common material of construction for pipes, valves and pumps in molten sulphur service. PVC pipes and fittings are also acceptable. Swivel joints are commonly used where flexibility is required. If flanged joints are used, they should be welded. Stress relief should be afforded at the weld to lengthen service life. All piping should be tested for leaks using appropriate methods and any leaks carefully sealed. If water is used for leak testing, the piping should be thoroughly dried before use with molten sulphur (CE 1978; MWPP 1978).

Unloading lines, bottom or top, are usually 51 mm (2 in.) diameter, but process piping may be almost any size. Pipe under 25 mm (1 in.), however, is not recommended. Most pipelines and equipment used to handle molten sulphur are heated with steam and insulated. Steam jacketing is a most effective way of controlling the temperature of molten sulphur. Since sulphur is a very poor conductor of heat, it is very difficult to remelt it in piping once the temperature has dropped below 115°C. The outdoor lines must therefore be self-draining. However, if pipelines are drained and allowed to cool, some of the residual sulphur may oxidize and cause corrosion.

For valving, stainless steel 316 plug valves or ball valves will serve adequately (JSSV 1979). Polyvinylidene fluoride resin or chlorinated polyether resin can be used satisfactorily as a gasket material (DCRG 1972). Different types of pumps are used in molten sulphur service, with centrifugal pumps being recommended. Some gear and piston pumps may also be used. The centrifugal pumps should be single-suction, sealless magnetic drive, with wet end material of 316 stainless steel. All pumps must be steam jacketed or steam traced. Due to the relatively high specific gravity of molten sulphur, large horsepower motors are required. When sulphur is stored in pits, sump pumps should be used (CE 1978).

Welded stainless steel storage tanks are commonly used. A sulphur-resistant lining is also acceptable. The storage tank should be well-insulated and provided with heating coils to keep the sulphur in a molten state. Pipelines and storage tanks should be grounded (CE 1978).

4.3 Compatibility with Materials of Construction.

The compatibility of sulphur with materials of construction is indicated in Table 4. The designation "other" listed in Table 4 refers to items where the specific application is not given or is unclear. The unbracketed abbreviations are described in Table 5. The rating system for this report is briefly described below.

Recommended: This material will perform satisfactorily in the given application.

Conditional: Material will show deterioration in the given application; however, it may be suitable for intermittent or short-term service.

Not Recommended: Material will be severely affected in this application and should not be used.

TABLE 4 COMPATIBILITY WITH MATERIALS OF CONSTRUCTION

Application	Chemical		Material of Construction		
	Conc.	Temp. (°C)	Recommended	Conditional	Not Recommended
1. Pipes and Fittings	n.d.[1]	23, to operating limit of material	PE[2] (DPPED 1967; MWPP 1978)		
	n.d.	60, to operating limit of material	PVC I (DPPED 1967; MWPP 1978)	PVC II (DPPED 1967)	
	100%	>120, dry, molten	Steel[3] (CE 1978)		
	n.d.	121, molten[4]	PVDF (DCRG 1972)		
	n.d.	121, molten[4]	Chlorinated Polyether (DCRG 1972)		
	n.d.	to operating[5] limits of materials	ABS (MWPP 1978)		
	100%	>120, dry, molten	Steel, mild Cast Iron (Kirk-Othmer 1979)		
2. Valves[6]	100%	>120, molten, dry	Steel[3] (CE 1978)		
	n.d.	<130, molten, dry	SS 316 (JSSV 1979)		

TABLE 4 COMPATIBILITY WITH MATERIALS OF CONSTRUCTION (Cont'd)

Application	Chemical		Material of Construction		
	Conc.	Temp. (°C)	Recommended	Conditional	Not Recommended
2. Valves[6] (cont'd)	n.d.	130 to 444.6 molten, dry			SS 316 (JSSV 1979)
	n.d.	n.d., wet		SS 316 (JSSV 1979)	
3. Gaskets	n.d.	n.d.[7]	PVDF (DCRG 1972)		
	n.d.	n.d.[7]	Chlorinated Polyether (DCRG 1972)		
4. Pumps	100%	>120, molten, dry	Steel[3] (CE 1978)		
	n.d.	n.d., molten	All Iron (HIS 1969)		
	n.d.	n.d.	SS 304, 316 (HIS 1969)		
5. Storage	100%	129-140 molten, dry	Steel[3,8] (Welded) (CE 1978)		
		130, molten	SS 316[9]		
	100%	129-140 molten, dry	Steel lined[10] with concrete (CE 1978)		
6. Others[11]	n.d.	20, dry	SS 302, 304, 316, 430 (ASS)	SS 410 (ASS)	
	n.d.	20, wet	SS 316 (ASS)	SS 302, 304, 430 (ASS)	SS 410 (ASS)
	n.d.	20[12]	PE, PP, POM, NR, NBR, IIR, EPDM, CR, FPM CSM (GF)	uPVC (GF)	
	n.d.	60[12]	PP, POM, NR, NBR,	uPVC PE (GF)	

TABLE 4 COMPATIBILITY WITH MATERIALS OF CONSTRUCTION (Cont'd)

Application	Chemical		Material of Construction		
	Conc.	Temp. (°C)	Recommended	Conditional	Not Recommended
6. Others (cont'd)			IIR, EPDM, CR, FPM, CSM (GF)		
	n.d.	60, slurry	PVC (TPS 1978)		
		85, slurry[13]	CPVC (TPS 1978)		
	n.d.	<120, solid moist	Steel alloys of Al, SS (Kirk-Othmer 1979)		
		Molten			NR, SBR, CR, NBR, IIR, CSM, EPDM (GPP)
	n.d.	n.d.	CSM (GPP)	EPDM (GPP)	NR SBR NBR (GPP) IIR (GPP)
	100%	>120, molten, dry			Copper Copper alloys (PB 216658)
	100%	24 to 149	Glass (CDS 1967)		
	100%	204			Glass (CDS 1967)
	100%	To 240, molten[12]	Ti (PMT) (AMC)		
	n.d.	>120, molten, dry	SS 304, 304L, 321, 347, 316, 316L Ni Monel, Inconel (SFC; GAC)		
	n.d.	n.d., wet	SS 316, 316L Inconel (SFC; GAC)	SS 304, 304L 321, 347 Ni Monel (SFC; GAC)	
	n.d.	high temp.			Ni Ni alloys (CE 1980)

TABLE 4 COMPATIBILITY WITH MATERIALS OF CONSTRUCTION (Cont'd)

Application	Chemical		Material of Construction		
	Conc.	Temp. (°C)	Recommended	Conditional	Not Recommended
6. Others (cont'd)	n.d.	232-1,010[12]	Alon steels (API)		

1. n.d. = No data given.
2. Material given a lower rating at higher temperatures by another reference.
3. Type of steel not stated.
4. Molten assumed, moisture content unknown.
5. Assumed capable of having either solid or molten sulphur.
6. Based on data given for pipes, valves, pumps and storage, one can assume that steel (probably SS 316) is adequate for handling molten, dry sulphur up to about 140°C.
7. Based on data under pipes and fittings; can be used for molten sulphur at 121°C.
8. For large quantities.
9. No reference stated.
10. For small quantities.
11. Many other materials for possible use with sulphur are listed under the "Others" category. No particular application was stated in the reference and specifics must be acquired before use of the material.
12. Moisture content not stated.
13. Slurry liquid not stated.

TABLE 5 MATERIALS OF CONSTRUCTION

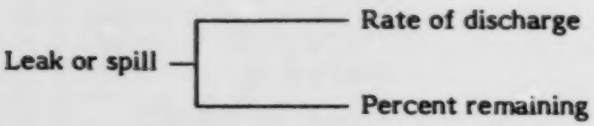
Abbreviation	Material of Construction
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
	Bronze
	Chlorinated Polyether
CPVC	Chlorinated Polyvinyl Chloride
CR	Polychloroprene (Neoprene)
CSM	Chlorosulphonated Polyethylene (Hypalon)
EPDM	Ethylene Propylene Rubber
FPM	Fluorine Rubber (Viton)
	Glass
	Iron
IIR	Isobutylene/Isoprene (Butyl) Rubber
NBR	Acrylonitrile/Butadiene Rubber (Nitrile, Buna N)
NR	Natural Rubber
PE	Polyethylene
POM	Polyoxymethylene
PP	Polypropylene
PVC (Followed by grade, if any)	Polyvinyl Chloride
PVDF	Polyvinylidene Fluoride
SBR	Styrene/Butadiene (GR-5, Buna N)
SS (Followed by grade)	Stainless Steel
uPVC	Unplasticized Polyvinyl Chloride

5 CONTAMINANT TRANSPORT

5.1 General Summary

Sulphur is transported as a solid in slate, granular or prill forms, and in the liquid state at elevated temperature. When spilled in water, liquid sulphur will sink, thicken, and solidify. There may be occasions where the molten material will form amorphous/plastic sulphur when spilled in very cold water. Large volumes of steam will be produced. When spilled on soil, the molten product will solidify on the surface. Transport of the liquid toward the water table is not an environmental concern. Because sulphur has a low vapour pressure, large-scale dispersion in air is not considered to be a problem. Local problems may occur, however, due to dispersion of powdered material that may have been generated as a result of an accident. A thin coating of sulphur on metal, e.g. equipment, structures, etc., may result in corrosion due to the formation of acids.

Factors considered for a sulphur spill are:



5.2 Leak Nomograms

5.2.1 Introduction. Sulphur is commonly transported in railway tank cars as a non-pressurized liquid at temperatures above 122°C. While the capacities of the tank cars vary widely, one tank car size has been chosen for development of the leak nomograms. It is approximately 2.75 m in diameter and 13.4 m long, with a carrying capacity of about 80,000 L. This size has been chosen for consistency through the EnviroTIPS manuals. It is recognized that the typical tank car for molten sulphur is 50,500 L.

If a tank car loaded with molten sulphur is punctured on the bottom, the contents will drain out by gravity. It is pointed out, however, that tank cars transporting molten sulphur are never heated during transit. A shell of solid sulphur tends to build up around the inside of the car, the thickness depending on the transit time and the outside air temperature. Rate of drainage would depend on the severity of the puncture and the outside temperature. It is conceivable that molten sulphur would solidify at the puncture and seal off the drainage completely (SUDIC 1983). The following leak nomograms are prepared for worst case situations, namely where all the sulphur leaks out. The aim of the nomograms is to provide a simple means to obtain the time history of the conditions in the

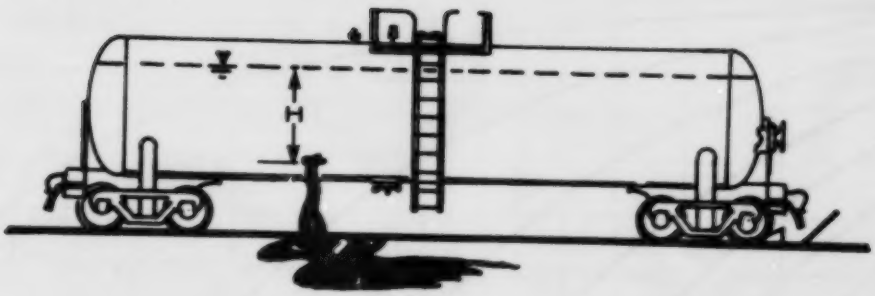


FIGURE 7 TANK CAR WITH PUNCTURE HOLE IN BOTTOM

tank car and the discharge rate of the liquid. Because liquid sulphur is not highly volatile and the tank cars are not pressurized, no leak nomograms have been prepared for vapour release from a puncture in the top of the tank.

The rate of outflow (q) from a puncture hole in the bottom of the tank car is defined by the standard orifice equation (Streeter 1971). The discharge rate (q) is a function of the hole size (A) and shape, the height of the fluid above the puncture hole (H), and a coefficient of discharge (Cd). For the purposes of nomogram preparation, a constant discharge coefficient of 0.8 has been assumed.

5.2.2 Nomograms.

5.2.2.1 Figure 8: Percent remaining versus time. Figure 8 provides a means of estimating the percent of liquid remaining in the standard tank car after the time of puncture, for a number of different hole diameters. The hole diameter is actually an equivalent diameter and can be applied to a noncircular puncture.

The standard tank car (2.75 m Ø x 13.4 m long) is assumed to be initially full (at t=0) with a volume of about 80,000 L of molten sulphur. The amount remaining at any time (t) is not only a function of the discharge rate over time, but also of the size and shape of the tank car.

5.2.2.2 Figure 9: Discharge rate versus time. Figure 9 provides a means of estimating the instantaneous discharge rate (L/s) at any time (t) after the time of puncture, for a number of equivalent hole diameters. The nomogram is only applicable to the standard tank car size with an initial volume of 80,000 L.

FIGURE 8

SULPHUR

PERCENT REMAINING VS TIME

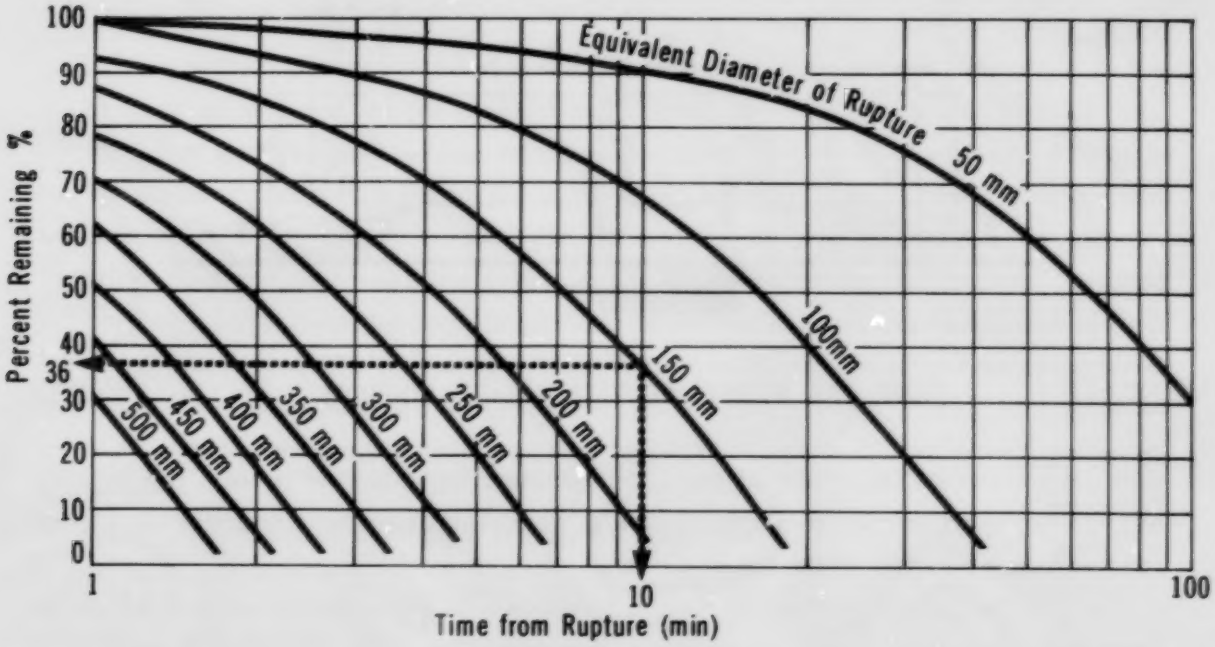
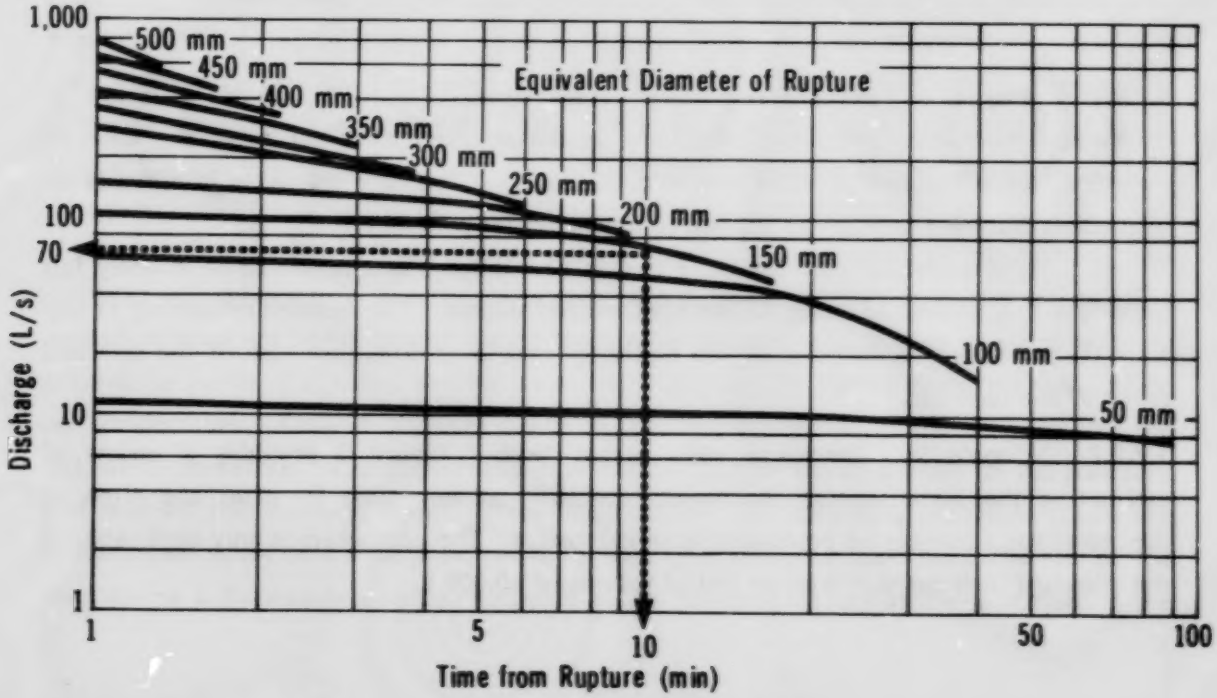


FIGURE 9

SULPHUR

DISCHARGE RATE VS TIME



5.2.3 Sample Calculations.

i) Problem A

The standard tank car (2.75 m Ø x 13.4 m long) filled with molten sulphur has been punctured on the bottom. The equivalent diameter of the hole is 150 mm. What percent of the initial 80,000 L remains after 10 minutes?

Solution to Problem A

- Use Figure 8
- With t=10 min and d=150 mm, the amount remaining is about 36 percent or 28,800 L

ii) Problem B

With the same conditions as Problem A, what is the instantaneous discharge rate from the tank 10 minutes after the accident?

Solution to Problem B

- Use Figure 9
- With t=10 min and d=150 mm, the instantaneous discharge rate (q) = 70 L/s

5.3 Dispersion in the Air

Since solid sulphur is nonvolatile and liquid sulphur will solidify fairly rapidly, there is no significant potential for large-scale dispersion in air. Local dusting may occur from storage piles or from powder generated at the spill site.

5.4 Behaviour with Water

Sulphur is transported in solid form or as a liquid at an elevated temperature. When spilled into water, molten sulphur in most cases will sink, thicken, and solidify. This insoluble material may not represent a significant source of water pollution in the short term; however, long-term effects should be considered. (See Sections 6.2.3, 6.5, 6.6, 9.1.3 and 9.1.4 for more discussion on the behaviour of sulphur with water and soil.) No nomograms have been prepared to describe its behaviour in water.

5.5 Subsurface Behaviour: Penetration into Soil

A spill of either molten or solid sulphur does not represent a significant source of groundwater pollution in the short term. See comments in Section 5.4 regarding the potential for long-term problems.

When spilled onto soil, molten sulphur will solidify prior to any significant movement into the soil. In solid form, sulphur is insoluble and cannot be transported downward to the groundwater table. The formation of acidic products from the reaction of sulphur and water may increase the potential for a long-term problem. Traces of hydrogen sulphide represent the only aqueous phase contaminant likely to be detected. Because of these considerations, soil penetration nomograms have not been prepared.

6 ENVIRONMENTAL DATA

6.1 Suggested or Regulated Limits

6.1.1 Water (WQS 1979). Drinking water limits for sulphur have not been set, although there are regulations governing its predominant oxidation and reduction products: sulphate and sulphide. The maximum acceptable sulphate level is 500 mg/L for drinking water and 1,000 mg/L for livestock; the objective is a level of 150 mg/L. The maximum acceptable sulphide level is 0.05 mg/L for drinking water. Sulphide in aerated water of normal pH rapidly oxidizes to sulphate.

6.1.2 Air. There are no quality standards set for sulphur. Standards of 830 and 30 $\mu g/m^3$ have been set for its possible reaction or combustion products, sulphur dioxide and hydrogen sulphide, respectively (Ontario E.P. Act 1971).

6.2 Aquatic Toxicology

6.2.1 U.S. Toxicity Rating. Sulphur has been assigned a TL_m 96 (4-day median lethal toxicity rating) of over 1,000 mg/L (RTECS 1979).

6.2.2 Measured Toxicities.

6.2.2.1 Freshwater toxicology.

Conc. (ppm)	Time (hours)	Species	Result	Water Conditions	Reference
Fish Kill Data					
16,000	5	Goldfish	100% mortality	colloidal sulphur in turbid water	NRCC 1977*
10 to 80	not specified	Goldfish	theoretical threshold		NRCC 1977
10,000	96	Mosquito fish	TL_m	turbid water	NRCC 1977
1,600	3.5 to 5.25	Goldfish	fatal	colloidal sulphur in tap water	NRCC 1977

* Dates of actual experiments range from 1922 to 1957.

No references were found dealing with the physiological effects of sulphur on aquatic invertebrates or microorganisms.

6.2.3 Aquatic Studies. Some general comments regarding both molten and solid sulphur spills are provided in this section. Molten sulphur, if spilled into water, will sink, thicken and solidify. Some bottom-related damage may occur as indicated below. A solid sulphur spill resulting in a colloidal suspension may cause problems similar to those caused by other suspended solids. These suspended solids may kill fish and shellfish by causing abrasive injuries or clogging the gills and respiratory passages. The sulphur that settles may blanket the bottom and kill eggs, young and food organisms, as well as destroy spawning beds. Thickened/solidified molten sulphur will probably cover the bottom in a much thicker layer and be more localized. Indirectly, the colloidal sulphur may be harmful to aquatic life by reducing light penetration sufficiently to reduce photosynthesis. Sulphur in colloidal suspension has been found to be toxic to fish at levels from 1,600 to 10,000 µg/L over several hours (PB 216658).

It is conceivable that other problems could occur due to a sulphur spill into the aquatic environment. Molten sulphur, for example, may contain significant amounts of hydrogen sulphide gas which would be released into the water. In addition, sulphur dispersed as a colloid will slowly oxidize, forming SO_2 and acidic conditions. These pollutants are toxic to aquatic life; the degree of the problems caused will depend on the conditions at the spill site and the nature of the aquatic system.

Sulphur reaches local watercourses, in limited amounts, by dusting of solid sulphur (slate form) during transportation and handling at ports; from runoff from storage areas; and from accidental spills (NRCC 1977).

6.3 Toxicity to Other Biota

6.3.1 Livestock.

Intake by Ingestion (g)	Species	Result	Reference
170 to 227	Cattle	death	NRCC 1977
227 to 397	Horses	death	NRCC 1977
2% sulphur (in diet)	Chicks	harmful	NRCC 1977
45	Sheep	colicky pains, depressed, unwilling to stand, 35% mortality	NRCC 1977
Herbage in mining areas	Lambs	copper deficiency diseases	Gough 1980

Toxicity to animals is due to super-purgation and to partial conversion of sulphur into hydrogen sulphide by bacteria of the alimentary tract (NRCC 1977).

6.3.2 Plants.

Conc.	Species	Result	Reference
0.118 to 0.154% (total S in dry matter)	Fir needles (1 yr old)	needles became heavier with increasing distance from source; fir growth rate decreased with decreasing needle weight	Zawada 1981
200 to 250 kg/ha/yr (S fungicide)	Cotton and soybean ecosystem	health declines	Jones 1980
740 to 3,420 ppm (S content of needles)	Scots pine (1 to 3 yr old needles)	visible injuries on needles, i.e. erosion of waxes	Lehtio 1980
700 to 4,250 ppm (S content of needles)	Norway spruce (1 to 3 yr old needles)	visible injuries on needles	Lehtio 1980

6.3.3 Insects.

Conc.	Species	Result	Reference
10 g/hive	Honeybees	lethal; reproduction ceased and bees gradually died out	Skrypnik 1980
5 g/hive	Honeybees	not toxic	Skrypnik 1980

6.3.4 General - Animal and Plant Life. Sulphur is essential for animal and plant life and is present in all tissues. Sulphur and its compounds, unlike many pollutants, occur naturally and participate in widespread cycling processes throughout the environment. The feeding of excess sulphur to ruminants can give rise to problems in that it may be converted to hydrogen sulphide in the rumen and poison the animal. A deficiency of sulphur, on the other hand, inhibits protein synthesis and induces general malaise. It is also known that excess amounts of certain sulphur compounds are toxic to plants. Compared with other major nutrients, however, knowledge is lacking on its dynamics in the soil-plant-animal system and on its nutritional and physiological roles in agriculture and forest growth (NRCC 1977).

6.4 Other Air and Land Toxicity

Natural sources of sulphur discharged to the atmosphere are derived from the hydrogen sulphide and other sulphur compounds released during the biological decay of vegetation and other organic matter on land and in the ocean, and from windblown sea salt and particulate matter. It has been calculated that annual global biogenic sulphur emissions are 62-110 x 10^6 metric tonnes from land and 58-170 x 10^6 metric tonnes from the sea. Sulphur derived from sea spray is 39-45 x 10^6 metric tonnes per year (NRCC 1977).

6.5 Degradation

6.5.1 Aquatic Environment. Sulphur is readily oxidized in an aerobic environment. Under aerated water, fresh or salt, the sediment in lakes will generally be found to lose sulphur to the water as sulphate (NRCC 1977; Sweeney 1980). Elemental sulphur may be produced through the utilization of hydrogen sulphide in water by the bacteriological attack of a number of species of thiobacilli. The rate of sulphur oxidation is a function of the physical form of the sulphur present (NRCC 1977).

6.5.2 Persistence in the Environment. Sulphur can slowly oxidize to sulphur dioxide in the presence of moisture (OHM-TADS 1981).

6.6 Long-term Fate and Effects

There is no potential for accumulation or food chain concentration (OHM-TADS 1981).

6.7 Soil

6.7.1 Soil Degradation of Material. The chemical forms of sulphur in soil are presently recognized as 1) organic, 2) water-soluble sulphate, 3) absorbed sulphate, 4) insoluble sulphate (e.g., barium sulphate), 5) insoluble sulphate co-precipitated with calcium carbonate, and 6) inorganic sulphur compounds of lower oxidation states than sulphate. In general, then, it can be considered to be present in the soil system in either an organic or inorganic form. In well-aerated soils, inorganic sulphur is present as sulphate, the form principally absorbed by plant roots. Waterlogged or poorly aerated mineral and organic soils contain reduced forms of sulphur. These latter compounds are unavailable to plants and may attain concentrations that are harmful to plant growth. Sulphur may be oxidized to sulphur dioxide or sulphates or reduced, depending on soil conditions (NRCC 1977).

6.7.2 Effects on Soil Biota. Gaseous sulphur compounds have been found to affect selected groups of soil and epigeal (living on soil surface) fauna. An increase in pollution resulted in a declining density of soil fauna; it eliminated earthworms and decreased the spider population; however, the number of ants increased with advancing environmental degradation (Puszkar 1979).

Studies have shown that high sulphur residues in soil greatly reduce carrot and bean production (Pimental 1971).

Certain plants, such as beech and oak seedlings and lichen, may be used as air pollution indicators of sulphur and heavy metals (Mankovska 1981; Peterson 1977).

7 HUMAN HEALTH

Elemental sulphur is thought to be virtually nontoxic. Chronic inhalation, however, can cause irritation of the mucous membranes. It is described in the literature as a nuisance dust (Sax 1979). Repeated contact may induce an allergic response (GE 1979). The primary human health hazards associated with elemental sulphur are burns resulting from contact with the molten material, residual hydrogen sulphide resulting from hydrocarbon impurities in the production process, sulphur dioxide resulting from combustion, and explosion resulting from the ignition of the dust or vapour.

The toxicological data summarized here have been extracted from published papers and reliable standard reference sources and are representative of information in the literature.

7.1 Recommended Exposure Limits

No recommended occupational exposure limits specifically for sulphur were found in the literature. Sulphur has been described as a nuisance dust (Sax 1979), but is not included in the class of nuisance particulates designated by USA-ACGIH. (A TLV• of 10 mg/m^3 for total dust and 5 mg/m^3 for respirable dust has been established by USA-ACGIH for nuisance particulates (TLV 1983).)

7.2 Irritation Data

7.2.1 Skin Contact. Sulphur dust can be irritating to the skin, inner surfaces of the eyelids, and the mucous membranes of the respiratory passages. It may enhance the development of skin pore blockages (Strauss 1978). Molten sulphur can cause serious skin burns.

No information on the effects to the skin of exposure to levels of elemental sulphur was found in the literature.

7.2.2 Eye Contact.

Exposure Level (and Duration)	Effects	Reference
SPECIES: Human		
8 ppm	Irritation	RTECS 1979

7.3 Threshold Perception Properties

No data.

7.4 Long-term Studies

7.4.1 Inhalation. No information pertaining to systemic poisoning from breathing sulphur dust was found in the literature.

7.4.2 Ingestion. No information pertaining to systemic poisoning from ingesting elemental sulphur was found in the literature, although metabolic acidosis has been observed after ingestion (Blum 1977). (Metabolic acidosis is bioreduction to acid within the body by metabolic activity.)

7.5 Symptoms of Exposure

General symptoms of exposure found in most information sources have not been specifically referenced. Only those of a more specific or unusual nature have their sources indicated.

7.5.1 Inhalation.

1. Irritation of respiratory passages.
2. Sneezing, coughing.

7.5.2 Ingestion.

1. Metabolic acidosis (Blum 1977).

7.5.3 Skin Contact.

1. Irritation of the skin.
2. Repeated contact may induce allergic response (GE 1979).
3. Molten sulphur will cause serious burns.

7.5.4 Eye Contact.

1. Mechanical irritation on inner surface of eyelid (GE 1979).
2. Watering of the affected eye(s).

7.6 Human Toxicity to Decay or Combustion Products

The principal residual of the sulphur production process is hydrogen sulphide (H_2S), while the principal combustion product is sulphur dioxide (SO_2). Both gases are toxic and are described below.

7.6.1 **Hydrogen Sulphide and Sulphur Dioxide.** Hydrogen sulphide is a colourless gas with an offensive odour which, in high concentrations, acts as a systemic poison causing unconsciousness and death through respiratory paralysis. In lower concentrations, hydrogen sulphide causes corneal damage, headaches, nausea and other such symptoms. The TLV* for hydrogen sulphide is 10 ppm (8 h - TWA); the STEL is 15 ppm (TLV 1983).

Sulphur dioxide is a colourless gas with a strong, suffocating odour which causes irritation of the mucous membranes and bronchoconstriction. The TLV* for sulphur dioxide is 2 ppm (8 h - TWA); the STEL is 5 ppm (TLV 1983).

Hydrogen sulphide is particularly dangerous in that it paralyses the olfactory glands; after exposure to the gas for a period of time, a worker may believe that the gas is no longer present.

8 CHEMICAL COMPATIBILITY

8.1 Compatibility of Sulphur with Other Chemicals and Chemical Groups

SPECIFIC CHEMICAL OR CHEMICAL GROUP	HEAT GENERATION	FIRE	EXPLOSION	FORMATION OF FLAMMABLE GASES	VIOLENT POLYMERIZATION	DECOMPOSITION	FORMATION OF TOXIC FUMES	FORMATION OF SUBSTANCES OF GREATER TOXICITY	PRESSURIZATION IN CLOSED VESSELS	SOLUBILIZATION	VIOLENT REACTION	NON-HAZARDOUS REACTION	SPECIFICS	REFERENCE
GENERAL														
Fire		x				x							Dust will easily ignite. Emits highly toxic SO_x fumes	Bretherick 1979; Sax 1979
SPECIFIC CHEMICALS														
Aluminum (powdered)	x												Violent reaction when heated	Bretherick 1979
Ammonia		x											May form explosive sulphur nitride	NFPA 1978
Ammonium Nitrate		x											Can be exploded by shock	NFPA 1978
Ammonium Perchlorate		x											Impact-sensitive	NFPA 1978
Barium Carbide	x												Ignition usually occurs	NPPA 1978
Boron	x												Becomes incandescent at 600°C	NFPA 1978
Bromine Pentafluoride	x	x												NFPA 1978

8.1 **Compatibility of Sulphur with Other Chemicals and Chemical Groups** (Cont'd)

SPECIFIC CHEMICAL OR CHEMICAL GROUP	HEAT GENERATION	FIRE	EXPLOSION	FORMATION OF FLAMMABLE GASES	VIOLENT POLYMERIZATION	DECOMPOSITION	FORMATION OF TOXIC FUMES	FORMATION OF SUBSTANCES OF GREATER TOXICITY	PRESSURIZATION IN CLOSED VESSELS	SOLUBILIZATION	VIOLENT REACTION	NON-HAZARDOUS REACTION	SPECIFICS	REFERENCE
Calcium		x	x										Calcium burns in sulphur vapour. Vapour reaction begins at about 480°C. When mixed with solid and ignited, reacts explosively	Bretherick 1979
Calcium Carbide	x												Becomes incandescent with sulphur vapour at 500°C	NFPA 1978
Calcium Phosphide	x												Incandescent at 300°C	NFPA 1978
Calcium Hypochlorite		x	x										When mixed with damp S_8, produces a brillant crimson flash with scattering of molten sulphur. Explosive when heated in a closed vessel	NFPA 1978
Charcoal (freshly calcined or lampblack)		x											With powdered sulphur, spontaneously flammable	Bretherick 1979

8.1 **Compatibility of Sulphur with Other Chemicals and Chemical Groups** (Cont'd)

SPECIFIC CHEMICAL OR CHEMICAL GROUP	HEAT GENERATION	FIRE	EXPLOSION	FORMATION OF FLAMMABLE GASES	VIOLENT POLYMERIZATION	DECOMPOSITION	FORMATION OF TOXIC FUMES	FORMATION OF SUBSTANCES OF GREATER TOXICITY	PRESSURIZATION IN CLOSED VESSELS	SOLUBILIZATION	VIOLENT REACTION	NON-HAZARDOUS REACTION	SPECIFICS	REFERENCE
Chlorine Dioxide		x	x										Spontaneously flammable and may produce an explosion	NFPA 1978
Chlorine Monoxide			x							x			Mere contact	NFPA 1978
Chlorine Trifluoride		x												NFPA 1978
Chromic Anhydride		x	x										Ignites when heated and may explode	NFPA 1978
Chromium Trioxide		x	x										Ignites when heated and may explode	NFPA 1978
Chromyl Chloride		x											Ignites spontaneously with dry sulphur	NFPA 1978
Diethyl Ether			x										When mixed with residue from evaporated, wet peroxidized ether	Bretherick 1979
Fluorine		x												Bretherick 1979
Indium	x												At ordinary temperature when heated, incandesces	NFPA 1978

8.1 Compatibility of Sulphur with Other Chemicals and Chemical Groups (Cont'd)

SPECIFIC CHEMICAL OR CHEMICAL GROUP	HEAT GENERATION	FIRE	EXPLOSION	FORMATION OF FLAMMABLE GASES	VIOLENT POLYMERIZATION	DECOMPOSITION	FORMATION OF TOXIC FUMES	FORMATION OF SUBSTANCES OF GREATER TOXICITY	PRESSURIZATION IN CLOSED VESSELS	SOLUBILIZATION	VIOLENT REACTION	NON-HAZARDOUS REACTION	SPECIFICS	REFERENCE
Iodine Penta-fluoride	x												Spontaneously, usually with incandescence	NFPA 1978
Iodine Pentoxide			x										Explosive when warmed	NFPA 1978
Lead Chlorate		x											Ignites at about 63°C to 67°C	NFPA 1978
Lead Chlorite			x											NFPA 1978
Lead Dioxide			x											NFPA 1978
Lithium			x							x			Very violent when either is molten	NFPA 1978
Lithium Carbide		x											Burns in sulphur vapour	NFPA 1978
Mercuric Nitrate			x											NFPA 1978
Mercuric Oxide			x							x			Violent explosion when heated in retort	NFPA 1978
Mercurous Oxide		x											Mixture of polymerized materials ignites from light impact	NFPA 1978
Nitrogen Dioxide		x											Sulphur burns vigorously in nitrogen dioxide	NFPA 1978

8.1 Compatibility of Sulphur with Other Chemicals and Chemical Groups (Cont'd)

SPECIFIC CHEMICAL OR CHEMICAL GROUP	HEAT GENERATION	FIRE	EXPLOSION	FORMATION OF FLAMMABLE GASES	VIOLENT POLYMERIZATION	DECOMPOSITION	FORMATION OF TOXIC FUMES	FORMATION OF SUBSTANCES OF GREATER TOXICITY	PRESSURIZATION IN CLOSED VESSELS	SOLUBILIZATION	VIOLENT REACTION	NON-HAZARDOUS REACTION	SPECIFICS	REFERENCE
Phosphorus (Yellow)		x	x										When warmed	Bretherick 1979
Phosphorus (red)	x										x		Ignition of intimate mixture	Bretherick 1979
Phosphorus (III) Oxide											x		Violent reaction in large amounts	Bretherick 1979
Potassium Nitride		x					x						Evolves ammonia and hydrogen sulphide in contact with water, when heated from highly flammable mixture	Bretherick 1979
Potassium Perchlorate			x										Can be exploded by a moderately strong impact	NFPA 1978
Potassium Permanganate			x										Explosive on heating with powdered sulphur	NFPA 1978
Rubidium Acetylide		x											Burns with molten sulphur	Bretherick 1979
Selenium Carbide	x												Incandesces with vapour	NFPA 1978
Silver Nitrate			x										Explodes on impact	NFPA 1978

8.1 Compatibility of Sulphur with Other Chemicals and Chemical Groups (Cont'd)

SPECIFIC CHEMICAL OR CHEMICAL GROUP	HEAT GENERATION	FIRE	EXPLOSION	FORMATION OF FLAMMABLE GASES	VIOLENT POLYMERIZATION	DECOMPOSITION	FORMATION OF TOXIC FUMES	FORMATION OF SUBSTANCES OF GREATER TOXICITY	PRESSURIZATION IN CLOSED VESSELS	SOLUBILIZATION	VIOLENT REACTION	NON-HAZARDOUS REACTION	SPECIFICS	REFERENCE
Silver Oxide		x											Ignites upon grinding	NFPA 1978
Sodium			x							x				NFPA 1978
Sodium Chlorite			x										If moistened	NFPA 1978
Sodium Hydride										x			With vapour	Bretherick 1979
Strontium Carbide	x												Incandesces at 500°C with a vapour	NFPA 1978
Tetraphenyllead			x											Bretherick 1979
Thallic Oxide			x										When ground	NFPA 1978
Thorium										x				NFPA 1978
Thorium Carbide	x												Incandesces when heated to 500°C	NFPA 1978
Tin	x									x				NFPA 1978
Uranium	x												Incandescent with boiling sulphur	NFPA 1978
Uranium Carbide		x											Ignites at about 500°C	Bretherick 1979
Zinc			x										Explosive when warmed	NFPA 1978

8.1 **Compatibility of Sulphur with Other Chemicals and Chemical Groups** (Cont'd)

SPECIFIC CHEMICAL OR CHEMICAL GROUP	HEAT GENERATION	FIRE	EXPLOSION	FORMATION OF FLAMMABLE GASES	VIOLENT POLYMERIZATION	DECOMPOSITION	FORMATION OF TOXIC FUMES	FORMATION OF SUBSTANCES OF GREATER TOXICITY	PRESSURIZATION IN CLOSED VESSELS	SOLUBILIZATION	VIOLENT REACTION	NON-HAZARDOUS REACTION	SPECIFICS	REFERENCE
CHEMICAL GROUPS														
Bromates			x										When mixed with finely divided sulphur will explode with heat, percussion and sometimes light friction (Ba, Ca, Mg, K, Na, or Zn only)	NFPA 1978
Chlorates		x											Liberates oxygen and heat explosively (Ba, Ca, Mg, K, Na or Zn only)	NFPA 1978
Hydrocarbons		x				x	x						With molten sulphur only, generates hydrogen sulphide and carbon disulphide which may accumulate in explosive concentrations	NFPA 1978

8.1 Compatibility of Sulphur with Other Chemicals and Chemical Groups (Cont'd)

SPECIFIC CHEMICAL OR CHEMICAL GROUP	HEAT GENERATION	FIRE	EXPLOSION	FORMATION OF FLAMMABLE GASES	VIOLENT POLYMERIZATION	DECOMPOSITION	FORMATION OF TOXIC FUMES	FORMATION OF SUBSTANCES OF GREATER TOXICITY	PRESSURIZATION IN CLOSED VESSELS	SOLUBILIZATION	VIOLENT REACTION	NON-HAZARDOUS REACTION	SPECIFICS	REFERENCE
Iodates			x										When mixed with finely divided sulphur, will explode with heat, percussion, light friction (Ba, Ca, Mg, K, Na, or Zn)	NFPA 1978
Metal Oxides		x	x										(e.g. Ag_2O, HgO, Hg_2O, PbO_2, Na_2O_2, and Tl_2O_3)	Bretherick 1979
Metals		x	x										(e.g. Pd, Rh, V, Os, Ni, Mg, Gd, K, Rb, Se)	Bretherick 1979
Perchlorates			x										All inorganic perchlorates can form mixtures with sulphur that can explode on impact	NFPA 1978
Oxidizing Agents			x	x				x					Generate SO_2	EPA 600/2-80-076
Reducing Agents			x											EPA 600/2-80-076

9 COUNTERMEASURES

9.1 Recommended Handling Procedures

The following procedures have been derived from a literature review. To avoid any deviation from the intended meaning, the wording of the original source has been presented essentially unchanged - in so doing, it is recognized that there may be some discrepancies between different sources of information. It is recognized that countermeasures are dependent on the situation, and thus what may appear to be conflicting information may in fact be correct for different situations. These procedures should not be considered as Environment Canada's recommendations.

9.1.1 Fire/Explosion Concerns. Sulphur is a combustible solid which releases toxic sulphur dioxide gas while burning. Molten sulphur can react with hydrocarbons and other organic materials to produce toxic hydrogen sulphide and carbon disulphide which may accumulate to explosive concentrations (NFPA 1978). It can react exothermically, as an oxidizing agent, with carbides and metals. It can be dangerously explosive when intimately mixed with oxidizing agents such as nitrates and chlorates (GE 1979). Sulphur dust is a moderate explosion hazard when dispersed in air.

9.1.2 Fire Extinguishing Agents. Use water spray to cool containers involved in a fire (ERG 1980). Avoid straight streams of water which will scatter molten sulphur and dust (NFPA 1978).

Small fires: Dry chemical, sand, water spray or foam.
Large fires: Water spray, fog or foam.

Move containers from fire area if this can be done without risk. For massive fire in cargo area, use unmanned hose holder or monitor hose (ERG 1980).

9.1.3 Spill Actions.

9.1.3.1 General. Stop or reduce discharge of material if this can be done without risk. Eliminate all sources of ignition. Avoid skin contact with molten material or inhalation of dust or fumes (GE 1979).

9.1.3.2 Spills on land. When spilled in a molten form, contain if possible by forming mechanical or chemical barriers and let it solidify. Shovel solid sulphur, whether solidified from molten state or spilled in solid form, into containers with covers (avoid dusting) for recovery or disposal (ERG 1980; GE 1979; EPA 670/2-75-042).

9.1.3.3 Spills in water. When spilled in a molten form, contain if possible by using natural deep water pockets, and sand bag barriers to trap material at the bottom. Remove trapped material with suction hoses (EPA 670/2-75-042). Generally, when molten sulphur is spilled into water, it will sink, thicken, and solidify. There may be occasions when the molten material will form amorphous plastic sulphur, e.g. when spilled into very cold water (SUDIC 1983). If removal is not possible, let the material solidify and apply a cover material, preferably inert and basic (limestone), to the spill area until recovery procedures begin. This will reduce the possible formation and release of sulphuric acid in the water (CG-D-56-78).

9.1.4 Cleanup and Treatment.

9.1.4.1 Spills in water. Use mechanical dredges or lifts to remove immobilized masses of sulphur and precipitate from the bottom (EPA 670/2-75-042).

9.1.5 Disposal. Waste sulphur must never be discharged directly into sewers or surface waters. The combustion of sulphur is not a recommended disposal technique, since sulphur dioxide is produced. The contaminated material can be recovered or it can be mixed with three (3) parts by weight of calcium carbonate and buried in a secure landfill. The calcium carbonate will neutralize any sulphuric acid that might be generated (GE 1979).

9.1.6 Protective Measures. For entry into a situation where the spilled material and its characteristics are unknown, self-contained breathing apparatus and a totally encapsulated chemical suit should be worn.

If the spilled material is known to be sulphur, the following worst case protective measures are recommended:

- Self-contained breathing apparatus with a full facepiece operated in pressure-demand or other positive pressure mode should be worn to avoid over-exposure (from known or suspected effects) and for firefighting purposes. Under certain conditions where fire is not involved and the presence of hydrogen sulphide is not detected, normal dust protection will suffice (Ashland MSDS).
- Response personnel should be provided with and required to use chemical splash or dust-proof goggles, face shields (20 cm minimum), heat-resistant gloves and clothing (Ashland MSDS). Non-heat-resistant gloves may be adequate for non-fire situations or where the spilled sulphur is in a form other than molten.

- Clean work clothes should always be used. Do not use clothing which is impregnated with sulphur dust (GE 1979).
- The following chemical suit materials are recommended for protection against sulphur (EE-20): butyl and neoprene (excellent resistance).
- Eye wash stations and washing facilities should be readily available where exposure to sulphur dust may occur (GE 1979).

9.1.7 Special Precautions. Store in a cool, ventilated area away from sources of heat and ignition and away from oxidizing agents and reactive chemicals. Guard against conditions or actions that could disperse sulphur dust in air. Provide grounding, humidification, etc., when handling powdered sulphur to prevent static sparks from electrical charges which may develop. Use nonsparking tools (GE 1979).

10 PREVIOUS SPILL EXPERIENCE

This section contains information on previous spill experiences which will be useful to readers in understanding spill response and countermeasures. Only those which meet the criteria are included; thus, the number of experiences is not an indication of the problems or frequency of spillage. As technology in spill control advances, this section will be updated in future manual revisions to include the most useful information.

10.1 Train Derailment (Personal Communication SUDIC 1982)

A derailment occurred in which 30 of 80 hopper cars carrying approximately 6,000 tonnes of solid sulphur sustained damage and several began burning. Five cars were found to be burning out of control. Firefighters arrived at the site and applied water spray to the burning cars. Soil was used to smother small sulphur fires on the ground. Water bombers were called and applied a water-diammonium phosphate mixture to the larger fires. The plume from the fire was monitored and observations indicated that it was drifting towards a populated area. The area was evacuated immediately. After the fire was extinguished, the contaminated (spilled) sulphur was removed and deposited at an industrial waste site. Soil samples were taken to determine soil damage, if any, and to monitor pH levels.

The following observations on this spill response can be made:

- Although any conventional firefighting technique can be used, water fog works better than spray since water does not wet the sulphur surface and runs off without soaking in. Foam, in turn, is better than fog.
- Because sulphur burns with a nearly invisible flame, it is difficult to tell when a fire is completely extinguished. Firefighters should remain on-scene during cleanup to ensure that the fire is out and to take action if the sulphur is reignited.
- Sulphur has a low heat of combustion so that fumes (sulphur dioxide), rather than heat, are generally the major firefighting hazard. Response personnel must use SCBA and protective clothing.
- Monitoring the fume plume is necessary for evacuation preparedness.

11 ANALYTICAL METHODS

The general approach adopted for each of the Priority Chemicals was as follows.

Methods have been documented here for analyses of samples from air, water and soil in a normally equipped chemical laboratory remote from the spill site. Customary sources of standard or recommended analytical methods were consulted, and outlines are presented for each chemical. These sources included publications of the U.S. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), the U.S. Environmental Protection Agency (EPA), the American Water Works Association (AWWA), the American Society for Testing and Materials (ASTM), and the American National Standards Institute (ANSI).

If the standard or recommended methods were judged to be reliable and specific enough for the analysis of environmental and materials samples from spill sites and if they did not require highly specialized laboratory equipment, no additional methods were sought.

If especially simple, reliable tests (e.g., commonly used industrial methods) were found, they have been presented as well. Depending on the situation, monitoring for sulphur dioxide and hydrogen sulphide may also be necessary. Consult the EnviroTips manuals specific to these for procedures.

11.1 Detection of Sulphur in Air, Water and Soil

Since sulphur is not volatile, is insoluble in water and is heavier than water, sulphur contamination of the air or water in the event of a spill would only be expected in a localized area. Visual inspection of the spill site will determine if sulphur has been spilled. Sulphur is a pale yellow, odourless, solid (may be slates, granules or prills) or a yellow to orange-brown liquid (molten). It may be identified by an ignition test. When heated in a crucible, sulphur ignites at a low temperature and burns with a pale blue flame, forming acrid sulphur dioxide gas (Welcher 1955).

11.2 Quantitative Method for the Detection of Elemental Sulphur in Soil or Sediments

After a sulphur spill has been removed, the soil or sediment may be analyzed for traces of sulphur that may remain (Hesse 1972). The following method may be used for concentrations of 20 to 140 ppm sulphur in soil if a 5 g sample of dried soil is used. This range may be extended by varying the sample size.

A representative sample of soil or sediment is collected. It is dried in vacuo over phosphorus pentoxide and in the presence of alkaline pyrogallol. The latter is prepared, as required, by mixing 40 percent aqueous potassium hydroxide with 25 percent aqueous pyrogallol solution in the ratio of 4:1. The dry sample is ground in an agate mortar, and a suitable aliquot is weighed into a centrifuge tube. Acetone, 25 mL, is added and the sample is shaken for 5 minutes. It is centrifuged at 400 rev/s for 15 minutes. A suitable aliquot of the clear supernatant is placed in a 100 mL volumetric flask containing about 80 mL of water, with gentle shaking during the process. Colloidal sulphur begins to form immediately. The volume is brought up to 100 mL with water. It is mixed and allowed to stand for 3 hours before the optical density is measured at 420 nm using a suitable photometer. Standard sulphur solutions are used to prepare a standard curve. These standards should cover the range 0-10 $\mu g/cm^3$ sulphur and are prepared from recrystallized sulphur and pure, redistilled acetone.

12 REFERENCES AND BIBLIOGRAPHY

12.1 References

AMC: Astro Metallurgical Corp., Corrosion Resistance Chart for Ti, Zr, Ta, Wooster, Ohio. Not dated.

API: Alon Processing Inc., Alonized Steels for High Temperature and Corrosive Service", Tarentum, PA. Not dated.

Ashland MSDS: Ashland Oil Inc., Material Safety Data Sheet, Columbus, Ohio. Not dated.

ASS: Atlas Steel, Atlas Stainless Steels, Toronto, Ontario. Not dated.

Blum 1977: Blum, J.E., Coe, F.L., "Metabolic Acidosis After Sulphur Ingestion", New England Journal of Medicine, Vol. 297, No. 16, pp. 869-870. (1977).

Bretherick 1979: Bretherick, L., Handbook of Reactive Chemical Hazards, Second Edition, Butterworths, London, England. (1979).

CBG 1980: Southam Business Publications Ltd., "1981 Chemical Buyers' Guide", Canadian Chemical Processing, Vol. 64, No. 9, Don Mills, Ontario. (December, 1980).

CCPA 1982: Canadian Chemical Producers' Association, Private Communication, Ottawa, Ontario. (1982).

CDS 1967: National Association of Corrosion Engineers, Corrosion Data Survey, Houston, Texas. (1967).

CE 1978: Krienberg, M., "Handling Molten Sulphur", Chemical Engineering, McGraw-Hill Book Company, New York, New York, pp. 125-126. (December 4, 1978).

CE 1980: Kirby, G.N., "How to Select Materials", Chemical Engineering, McGraw-Hill Book Company, New York, New York, pp. 87-131. (November 3, 1980).

CELC 1980: Good, D.R., Doering, R.L., Compendium of Environmental Law in Canada 1980, Vols. 1 & 2, D.R. Good Publishing Services, Ottawa, Canada. (1980).

CG-D-56-78: Hand, T.D. et al., A Feasibility Study of Response Techniques for Discharges of Hazardous Chemicals that Sink, U.S. Coast Guard, Washington, D.C., CG-D-56-78. (June, 1978).

CHRIS 1978: U.S. Department of Transportation, Coast Guard, Chemical Hazards Response Information System (CHRIS), Washington, D.C. (1978).

CLC 1974: Association of American Railroads, The Car and Locomotive Cyclopedia of American Practices, Published by Simmons-Boardman, Omaha, Nebraska. (1974).

Corpus 1982: Corpus Information Services Ltd., "Sulphur", Chemical Product Profiles, Don Mills, Ontario. (15 June 1982).

CMI 1980: Annual Review of the Canadian Mineral Industry 1980, Department of Energy, Mines & Resources. (1980).

Cotton 1972: Cotton, F.A., Wilkinson, G., Advanced Inorganic Chemistry, Interscience Publishers, New York. (1972).

CRC 1957: Hodgman, C.D. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 39th Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland Ohio, (1957).

CRC 1980: Weast, R.C. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 60th Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, Ohio. (1980).

CRC 1982: Weast, R.C. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 61th Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, Ohio. (1982).

DCRG 1972: Dow Chemical Company, Dow Chemical Resistance Guide for Dow Plastic Lined Piping Products, Midland, Michigan. (1972).

DNACP 1979: Directory of North American Chemical Producers, Chemical Information Sources Ltd., Oceanside, New York. (1978/79).

Doc. TLV 1980: American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), Documentation of Threshold Limit Values, Fourth Edition, Cincinnati, Ohio. (1980).

DPPED 1967: DOM-X, DOM-X Plastic Pipe Engineering Data, Toronto, Ontario. (1967).

EE-20: Buchan, Lawton, Parent Ltd., A Survey of Self-Contained Breathing Apparatus and Totally-Encapsulated Chemical Protection Suits, Unedited Version. Not dated.

EPA 600/2-80-076: Hatayama, H.K., Chen, J.J., deVera, E.R., Stephens, R.D., Storm, D.L., A Method for Determining the Compatibility of Hazardous Wastes, Municipal Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. (April, 1980).

EPA 670/2-75-042: Pilie, R.J. et al., Methods to Treat, Control and Monitor Spilled Hazardous Materials, U.S. Environmental Protection Agency, National Environmental Research Center, Cincinnati, Ohio, EPA 670/2-75-042. (June, 1975).

ERG 1980: U.S. Department of Transportation, Hazardous Materials, 1980 Emergency Response Guidebook, U.S. Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, Materials Transportation Bureau, Washington, D.C. (1980).

FMT: Futura Metal Technology, Corrosion Data Sheet, West Lake Village, CA. Not dated.

GAC: Gale Alloy Corp., Corrosion Resistance Data for Non-Magnetic SS-Catalog No. 1280, Amityville, N.Y. Not dated.

GE 1979: General Electric Company, Material Safety Data Sheets, Material Safety Information Services, Schenectady, New York. (October, 1979).

GF: GF Plastic Systems Inc., GF Plastic Systems, Santa Ana, California. Not dated.

Gough 1980: Gough, L.P., Shacklette, H.T., Case, A.A., Elemental Concentrations Toxic to Plants, Animals, and Man, U.S. Department of Interior, Washington, D.C., pp. 46-48. (1980).

GPP: Uniroyal, Guide to Polymer Properties, Uniroyal Inc., Mishawaka, Indiana. Not dated.

Hesse 1972: Hesse, P.R., A Textbook of Soil Chemical Analysis, Chemical Publishing Co. Inc., New York, New York, p. 326. (1972).

HIS 1969: Hydraulic Institute, Hydraulic Institute Standards, 12th Edition, New York, New York. (1969).

JANAF 1971: Stull, D.R., Prophet, H., JANAF Thermochemical Tables, Second Edition, Office of Standard Reference Data, U.S. National Bureau of Standards, Washington, D.C. (June, 1971).

Jones 1980: Jones, U.S., Tuarez, E.L., "Impact of Atmospheric Sulphur Deposition on Agroecosystems", Environ. Impact Health Eff., Second Proceedings of Life Science Symposium, pp. 337-396. (1980).

JSSV 1979: Jenkins Brothers, Jenkins Corrosion Resistant Stainless Steel Valves, New York, New York. (1979).

Kirk-Othmer 1979: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Third Edition, Vol. 22, John Wiley & Sons, New York. (1979).

Lange's Handbook 1979: Dean, J.A. (ed.), Lange's Handbook of Chemistry, 12th Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, New York. (1979).

Lehtio 1980: Lehtio, H., Tuutilainen, J., Jantunen, M., "Visible Injuries and Sulphur Contents of the Needles of *Pi us sylvestris* and *Picea abies* in the City of Kuopio and Around Two Factories in Central Finland", Ann. Bot. Fenn., Vol. 17, No. 1, pp. 1-6. (1980).

Mankovska 1981: Mankovska, B., "Contamination of Beech and Oak by Magnesium, Sulphur, Fluorine, Lead, Cadmium and Zinc Near Magnesite Works", Biologia (Bratislava), Vol. 36, No. 7, pp. 489-496. (1981).

MCA 1959: Manufacturing Chemists Association, Sulphur, Washington, D.C. (1959).

Meyer 1965: Meyer, B. (ed.), Elemental Sulphur, Chemistry and Physics, University of Washington, John Wiley & Sons Inc., New York, New York. (1965).

Meyer 1977: Meyer, E., Chemistry of Hazardous Materials, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. (1977).

MWPP 1978: Rehau, Mechan-O-Joint Water Pressure Pipe and Fittings, Montreal, Quebec. (1978).

NBS 1982: National Bureau of Standards, The NBS Tables of Chemical Thermodynamic Properties, Washington, D.C. (1982).

NFPA 1978: National Fire Protection Association, Fire Protection Guide on Hazardous Materials, Seventh Edition, Boston, Massachussetts. (1978).

NRC 1981: National Research Council, Prudent Practices for Handling Chemicals in Laboratories, National Academy Press, Washington, D.C. (1981).

NRCC 1977: National Research Council of Canada, Sulphur and Its Inorganic Derivatives in the Canadian Environment, NRCC No. 15015, Ottawa, Canada. (1977).

OHM-TADS 1981: Oil and Hazardous Materials Technical Assistance Data System, U.S. Environmental Protection Agency, Oil and Special Materials Control Division, Office of Water Program Operations, Washington, D.C. (1981).

Ontario E.P. Act 1971: Ontario Ministry of the Environment, "The Environmental Protection Act, Statutes of Ontario 1971", Chapter 86, as amended; and Regulation 15 (General) as amended. (1971).

Orchard 1982: Orchard, D., "Safety in Sulphur Handling", Canadian Chemical Processing, Vol. 66, No. 1, pp. 34-39. (19 February 1982).

ORER 1983: The Official Railway Equipment Register, Interstate Commerce Commission and Canadian Transport Commission, published by R.E.R. Publishing Corporation, New York, New York. (1983).

PB 216658: U.S. Department of the Interior, Federal Water Pollution Control Administration, Oil & Hazardous Material. Emergency Procedures in the Water Environment, Edison, New Jersey, CWR 10-1, PB 216658 (NTIS 18). (October, 1968).

Personal Communication SUDIC 1982: Personal Communication, Sulphur Development Institute of Canada, Calgary, Alberta. (June 11, 1982).

Peterson 1977: Peterson, W.L., Douglas, G.W., "Air Quality Monitoring with a Lichen Network: Baseline Data", Environmental Research Monograph, No.5, Syncrude Canada Ltd., Edmonton, Alberta. (1977).

Pimental 1971: Pimental, D., Ecological Effects of Pesticides on Non Target Species, Presidential Report, Office of Science and Technology. (June, 1971).

Puszkar 1979: Puszkar, T., "Changes in Epigeal Predatory Fauna in an Area Exposed to Emissions from the Sulphur Mine at Jeziorko Near Tarnobrzeg, Poland", Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. Sci. Biol., Vol. 27, No. 6, pp. 481-485. (1979).

Rosenstock 1977: Rosenstock, H.M., Draxl, K., Steiner, B., Herron, J.T., Energetics of Gaseous Ions, National Bureau of Standards, Washington, D.C. (1977).

RTDCR 1974: Regulations for the Transportation of Dangerous Commodities by Rail, Canadian Transport Commission, Published by Supply and Services Canada, Ottawa, Ontario. (1974).

RTECS 1979: Lewis, R.J., Tatken, R.L., Registry of Toxic Effects of Chemical Substances, 1979, Vols.1 and 2, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Cincinnati, Ohio. (September, 1980).

Sax 1979: Sax, N.I., Dangerous Properties of Industrial Materials, Fifth Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York, New York. (1979).

SFC: Standard Fittings Co., Corrosion Resistance Chart, Opelousas, LA. (June, 1982).

Shell 1982: Shell Canada Resources Ltd., Handling Guide for Molten Sulphur Tank Cars, Calgary, Alberta. (1982).

Shreve 1977: Shreve, R.N., Brink, J.A., Chemical Process Industries, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, New York. (1977).

Skrypnik 1980: Skrypnik, E.I., Artemenko, L.P., Shatenkov, I.S., "Safe and Toxic Doses of Sulphur for Bees", Tekhnol. Proizvod. Prod. Pchelovod., pp. 207-209. (1980).

Strauss 1978: Strauss, J.S., Goldman, P.H., Nacht, S., Gans, E.H., "A Reexamination of the Potential Comedogenicity of Sulphur", Arch. Dermatol., Vol. 114, No. 9, pp. 1340-1342. (September, 1978).

Streeter 1971: Streeter, V.L., Fluid Mechanics, Fifth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, New York. (1971).

SUDIC 1983: Private Communication, Sulphur Development Institute of Canada, Calgary, Alberta. (January 28, 1983).

Sweeney 1980: Sweeney, R.E., Kalil, E.K., Kaplan, I.R., "Characterization of Domestic and Industrial Sewage in Southern California Coastal Sediments Using Nitrogen, Carbon, Sulphur and Uranium Tracers", Marine Environment Research, Vol. 3, No. 3, pp. 225-243. (1980).

TCM 1979: General American Transportation Corporation, Tank Car Manual, Chicago, Illinois. (May, 1979).

TDGC 1980: Transport Canada, Transportation of Dangerous Goods Code, Vol. 1 (Lists), Vol. 2, Ottawa, Ontario. (June, 1980).

TLV 1983: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, TLV®s Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents in the Workroom Environment with Intended Changes for 1983-84, Cincinnati, Ohio. (1983).

TPS 1978: GSR Fluid Handling, Thermoplastic Piping Systems, Sun Valley, California. (1978).

Welcher 1955: Welcher, F.J., Hain, R.B., Semimicro Qualitative Analysis, D. Van Nostrand Co. Inc., Princeton, New Jersey, p. 468. (1955).

WQC 1963: McKee, J.E., Wolf, H.W., Water Quality Criteria, Second Edition, Resources Agency of California, State Water Quality Control Board. (1963).

WQS 1979: McNeily, R.N., Neimans, V.P., Dwyer, L., Water Quality Sourcebook: A Guide to Water Quality Parameters, Inland Waters Directorate, Water Quality Branch, Environment Canada, Ottawa. (1979).

Zawada 1981: Zawada, J., Widera, S., "Sulphur Content in Needles as a Possible Cause of Fir Regression", Sylwan, Vol. 124, No. 7, pp. 63-66. (1981).

12.2 Bibliography

Alon Processing Inc., Alonized Steel for High Temperature and Corrosive Service, Tarentum, PA. Not dated.

Annual Review of the Canadian Mineral Industry 1980, Department of Energy, Mines and Resources. (1980).

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), Documentation of Threshold Limit Values, Fourth Edition, Cincinnati, Ohio. (1980).

American Conference of Governmental Industrial Hygienists, TLV®s Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents in the Workroom Environment with Intended Changes for 1983-84, Cincinnati, Ohio. (1983).

Ashland Oil Inc., Material Safety Data Sheet, Columbus, Ohio. Not dated.

Association of American Railroads, The Car and Locomotive Cyclopedia of American Practices, Published by Simmons-Boardman, Omaha, Nebraska. (1974).

Astro Metallurgical Corp., Corrosion Resistance Chart for Ti, Zn, Ta, Wooster, Ohio. Not dated.

Atlas Steel, Atlas Stainless Steels, Toronto, Ontario. Not dated.

Blum, J.E., Coe, F.L., "Metabolic Acidosis After Sulphur Ingestion", New England Journal of Medicine, Vol. 297, No. 16, pp. 869-870. (1977).

Bretherick, L., Handbook of Reactive Chemical Hazards, Second Edition, Butterworths, London, England. (1979).

Buchan, Lawton, Parent Ltd., A Survey of Self-Contained Breathing Apparatus and Totally-Encapsulated Chemical Protection Suits, Unedited Version. Not dated.

Canadian Chemical Producers' Association, Private Communication, Ottawa, Ontario. (1982).

Canadian Transport Commission, Regulations for the Transportation of Dangerous Commodites by Rail, Published by Supply and Services Canada, Ottawa, Ontario. (1976).

Corpus Information Services Ltd., "Sulphur", Chemical Product Profiles, Don Mills, Ontario. (15 June 1981).

Cotton, F.A., Wilkinson, G., Advanced Inorganic Chemistry, Interscience Publishers, New York, New York. (1972).

Dean, J.A. (ed.), Lange's Handbook of Chemistry, 12th Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, New York. (1979).

Directory of North American Chemical Producers, Chemical Information Sources Ltd., Oceanside, New York. (1978/79).

DOM-X, DOM-X Plastic Pipe Engineering Data, Toronto, Ontario. (1967).

Dow Chemical Company, Dow Chemical Resistance Guide for Dow Plastic Lined Piping Products, Midland, Michigan. (1972).

Futura Metal Technology, Corrosion Data Sheet, West Lake Village, CA. Not dated.

Gale Alloy Corp., Corrosion Resistance Data for Non-Magnetic SS-Catalog No. 1280, Amityville, N.Y. Not dated.

General American Transportation Corporation, Tank Car Manual, Chicago, Illinois. (May, 1979).

General Electric Company, Material Safety Data Sheets, Material Safety Information Services, Schenectady, New York. (October, 1979).

GF Plastic Systems Inc., GF Plastic Systems, Santa Ana, California. Not dated.

Good, D.R., Doering, R.L., Compendium of Environmental Law in Canada 1980, Vols. 1 & 2, D.R. Good Publishing Services, Ottawa, Canada. (1980).

Gough, L.P., Shacklette, H.T., Case, A.A., Elemental Concentrations Toxic to Plants, Animals, and Man, U.S. Department of Interior, Washington, D.C., pp. 46-48. (1980).

GSR Fluid Handling, Thermoplastic Piping Systems, Sun Valley, California. (1978).

Hand, T.D. et al., A Feasibility Study of Response Techniques for Discharges of Hazardous Chemicals that Sink, U.S. Coast Guard, Washington, D.C., CG-D-56-78. (June, 1978).

Hatayama, H.K., Chen, J.J., deVera, E.R., Stephens, R.D., Storm, D.L., A Method for Determining the Compatibility of Hazardous Wastes, Municipal Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. (April, 1980).

Hesse, P.R., A Textbook of Soil Chemical Analysis, Chemical Publishing Co. Inc., New York, New York, p. 326. (1972).

Hodgman, C.D. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 39th Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, Ohio. (1957).

Hydraulic Institute, Hydraulic Institute Standards, 12th Edition, New York, New York. (1969).

Interstate Commerce Commission and Canadian Transport Commission, The Official Railway Equipment Register, Published by R.E.R. Publishing Corporation, New York, New York. (1983).

Jenkins Brothers, Jenkins Corrosion Resistant Stainless Steel Valves, New York, New York. (1979).

Jones, U.S., Tuarez, E.L., "Impact of Atmospheric Sulphur Deposition on Agroecosystems", Environ. Impact Health Eff., Second Proceedings of Life Science Symposium, pp. 337-396. (1980).

Kirby, G.N., "How to Select Materials", Chemical Engineering, McGraw-Hill Book Company, New York, New York, pp. 87-131. (November 3, 1980).

Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Third Edition, Vol. 22, John Wiley & Sons, New York. (1979).

Krienberg, M., "Handling Molten Sulphur", Chemical Engineering, McGraw-Hill Book Company, New York, New York, pp. 125-126. (December 4, 1978).

Lehtio, H., Tuutilainen, J., Jantunen, M., "Visible Injuries and Sulphur Contents of the Needles of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* in the City of Kuopio and Around Two Factories in Central Finland", Ann. Bot. Fenn., Vol. 17, No. 1, pp. 1-6. (1980).

Lewis, R.J., Tatken, R.L., Registry of Toxic Effects of Chemical Substances, 1979, Vols. 1 and 2, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Cincinnati, Ohio. (September, 1980).

Mankovska, B., "Contamination of Beech and Oak by Magnesium, Sulphur, Fluorine, Lead, Cadmium and Zinc Near Magnesite Works", Biologia (Bratislava), Vol. 36, No. 7, pp. 489-496. (1981).

Manufacturing Chemists Association, Sulphur, Washington, D.C. (1959).

McKee, J.E., Wolf, H.W., Water Quality Criteria, Second Edition, Resources Agency of California, State Water Quality Control Board. (1963).

McNeily, R.N., Neimans, V.P., Dwyer, L., Water Quality Sourcebook: A Guide to Water Quality Parameters, Inland Waters Directorate, Water Quality Branch, Environment Canada, Ottawa. (1979).

Meyer, B. (ed.), Elemental Sulphur, Chemistry and Physics, University of Washington, John Wiley & Sons Inc., New York, New York. (1965).

Meyer, E., Chemistry of Hazardous Materials, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1977).

National Association of Corrosion Engineers, Corrosion Data Survey, Houston, Texas. (1967).

National Bureau of Standards, The NBS Tables of Chemical Thermodynamic Properties, Washington, D.C. (1982).

National Fire Protection Association, Fire Protection Guide on Hazardous Materials, Seventh Edition, Boston, Massachussetts. (1978).

National Research Council, Prudent Practices for Handling Chemicals in Laboratories, National Academy Press, Washington, D.C. (1981).

National Research Council of Canada, Sulphur and Its Inorganic Derivatives in the Canadian Environment, NRCC No. 15015, Ottawa, Canada. (1977).

Oil and Hazardous Materials Technical Assistance Data System, U.S. Environmental Protection Agency, Oil and Special Materials Control Division, Office of Water Program Operations, Washington, D.C. (1981).

Ontario Ministry of the Environment, "The Environmental Protection Act, Statutes of Ontario 1971", Chapter 86, as amended; and Regulation 15 (General) as amended. (1971).

Orchard, D., "Safety in Sulphur Handling", Canadian Chemical Processing, Vol. 66, No. 1, pp. 34-39. (19 February 1982).

Personal Communication, Sulphur Development Institute of Canada, Calgary, Alberta. (June 11, 1982).

Peterson, W.L., Douglas, G.W., "Air Quality Monitoring with a Lichen Network: Baseline Data", Environmental Research Monograph, No.5, Syncrude Canada Ltd., Edmonton, Alberta. (1977).

Pilie, R.J. et al., Methods to Treat, Control and Monitor Spilled Hazardous Materials, U.S. Environmental Protection Agency, National Environmental Research Center, Cincinnati, Ohio, EPA 670/2-75-042. (June, 1975).

Pimental, D., Ecological Effects of Pesticides on Non Target Species, Presidential Report, Office of Science and Technology. (June, 1971).

Puszkar, T., "Changes in Epigeal Predatory Fauna in an Area Exposed to Emissions from the Sulphur Mine at Jeziorko Near Tarnobrzeg, Poland", Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. Sci. Biol., Vol. 27, No. 6, pp. 481-485. (1979).

Rehau, Mechan-O-Joint Water Pressure Pipe and Fittings, Montreal, Quebec. (1978).

Rosenstock, H.M., Draxl, K., Steiner, B., Herron, J.T., Energetics of Gaseous Ions, National Bureau of Standards, Washington, D.C. (1977).

Sax, N.I., Dangerous Properties of Industrial Materials, Fifth Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York, New York. (1979).

Shell Canada Resources Ltd., Handling Guide for Molten Sulphur Tank Cars, Calgary, Alberta. (1982).

Shreve, R.N., Brink, J.A., Chemical Process Industries, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, New York. (1977).

Skrypnik, E.I., Artemenko, L.P., Shatenkov, I.S., "Safe and Toxic Doses of Sulphur for Bees", Tekhnol. Proizvod. Prod. Pchelovod., pp. 207-209. (1980).

Southam Business Publications Ltd., "1981 Chemical Buyers' Guide", Canadian Chemical Processing, Vol. 64, No. 9, Don Mills, Ontario. (December, 1980).

Standard Fittings Company, Corrosion Resistance Chart, Opelousas, LA. (June, 1982).

Strauss, J.S., Goldman, P.H., Nacht, S., Gans, E.H., "A Reexamination of the Potential Comedogenicity of Sulphur", Arch. Dermatol., Vol. 114, No. 9, pp. 340-1342. (September, 1978).

Streeter, V.L., Fluid Mechanics, Fifth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, New York. (1971).

Stull, D.R., Prophet, H., JANAF Thermochemical Tables, Second Edition, Office of Standard Reference Data, U.S. National Bureau of Standards, Washington, D.C. (June, 1971).

Sulphur Development Institute of Canada, Private Communication, Calgary, Alberta. (June 11, 1982).

Sulphur Development Institute of Canada, Private Communication, Calgary, Alberta. (January 28, 1983).

Sweeney, R.E., Kalil, E.K., Kaplan, I.R., "Characterization of Domestic and Industrial Sewage in Southern California Coastal Sediments Using Nitrogen, Carbon, Sulphur and Uranium Tracers", Marine Environment Research, Vol. 3, No. 3, pp. 225-243. (1980).

Transport Canada, Transportation of Dangerous Goods Code, Vol. 1 (Lists), Vol. 2, Ottawa, Ontario. (June, 1980).

Uniroyal, Guide to Polymer Properties, Uniroyal Inc., Mishawaka, Indiana. Not dated.

U.S. Department of the Interior, Federal Water Pollution Control Administration, Oil & Hazardous Materials. Emergency Procedures in the Water Environment, Edison, New Jersey, CWR 10-1, PB 216658 (NTIS 18). (October, 1968).

U.S. Department of Transportation, Hazardous Materials, 1980 Emergency Response Guidebook, U.S. Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, Materials Transportation Bureau, Washington, D.C. (1980).

U.S. Department of Transportation, Coast Guard, Chemical Hazards Response Information System (CHRIS), Washington, D.C. (1978).

Weast, R.C. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 60th Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, Ohio. (1980).

Weast, R.C. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 61st Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, Ohio. (1982).

Welcher, F.J., Hain, R.B., Semimicro Qualitative Analysis, D. Van Nostrand Co. Inc., Princeton, New Jersey, p. 468. (1955).

Zawada, J., Widera, S., "Sulphur Content in Needles as a Possible Cause of Fir Regression", Sylwan, Vol. 124, No. 7, pp. 63-66. (1981).

EnviroTIPS

Common Abbreviations

BOD	biological oxygen demand
b.p.	boiling point
CC	closed cup
cm	centimetre
CMD	count median diameter
COD	chemical oxygen demand
conc.	concentration
c.t.	critical temperature
eV	electron volt
g	gram
ha	hectare
Hg	mercury
IDLH	immediately dangerous to life and health
Imp. gal.	imperial gallon
in.	inch
J	joule
kg	kilogram
kJ	kilojoule
km	kilometre
kPa	kilopascal
kt	kilotonne
L	litre
lb.	pound
LC_{50}	lethal concentration fifty
LC_{LO}	lethal concentration low
LD_{50}	lethal dose fifty
LD_{LO}	lethal dose low
LEL	lower explosive limit
LFL	lower flammability limit
m	metre
m	meta
M	molar
MAC	maximum acceptable concentration
max	maximum
mg	milligram
MIC	maximum immision concentration
min	minute or minimum
mm	millimetre
µg	microgram
µm	micrometre
°Be	degrees Baumé (density)
MMAD	mass median aerodynamic diameter
MMD	mass median diameter
m.p.	melting point
MW	molecular weight
N	newton
NAS	National Academy of Sciences
NFPA	National Fire Protection Association
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
nm	nanometre
o	ortho
OC	open cup
p	para
P_c	critical pressure
PEL	permissible exposure level
pH	measure of acidity/alkalinity
ppb	parts per billion
ppm	parts per million
P_s	standard pressure
psi	pounds per square inch
s	second
STEL	short-term exposure limit
STIL	short-term inhalation limit
T_c	critical temperature
TC_{LO}	toxic concentration low
T_d	decomposition temperature
TD_{LO}	toxic dose low
TL_m	median tolerance limit
TLV	Threshold Limit Value
T_s	standard temperature
TWA	time weighted average
UEL	upper explosive limit
UFL	upper flammability limit
VMD	volume mean diameter
v/v	volume per volume
w/w	weight per weight

Environnement Canada
Service de la protection de l'environnement

Environment Canada
Environmental Protection Service

collection
ENVIROGUIDE

LE SOUFRE

Canada

Avril 1984

COLLECTION «ENVIROGUIDE»

La collection «Enviroguide» est constituée de guides d'information technique à utiliser en cas de déversements de matières dangereuses. Chaque guide fournit une masse considérable d'information relative au produit chimique dont il traite. L'information ainsi présentée a pour but d'aider l'utilisateur à mettre sur pied un plan d'intervention en cas d'accident et à évaluer les incidences sur l'environnement que peut avoir tel ou tel polluant. Le contenu de chacun des guides a été vérifié par la Direction des services techniques du Service de la protection de l'environnement avant que ne soit autorisée sa publication. Il est à noter qu'une telle autorisation n'implique pas que le contenu des guides reflète les points de vue ou la politique du Service de la protection de l'environnement. De même, le fait de mentionner des marques déposées ou des noms de produits commerciaux ne doit pas être interprété comme une forme de recommandation.

collection
ENVIROGUIDE

LE SOUFRE

DIRECTION DES SERVICES TECHNIQUES
DIRECTION GÉNÉRALE DES PROGRAMMES
DE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT
SERVICE DE LA PROTECTION
DE L'ENVIRONNEMENT

OTTAWA
AVRIL 1984
ENVIRONNEMENT CANADA

Publication distribuée par le Service des publications
Service de la protection de l'environnement
Environnement Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 1C8

Édition française de
Sulphur
préparée par le Module d'édition française

English copy available at the above mentioned address

Imprimé
par le ministère des Approvisionnements et Services
N° de catalogue: Fn48-10/8-1984F
ISBN 0-662-92699-4

©
Ministre des Approvisionnements et Services
1984

AVANT-PROPOS

La collection «Enviroguide» a été lancée officiellement en 1983. Elle est constituée de guides d'information technique sur les produits chimiques qui sont les plus souvent en cause dans les cas de déversements accidentels. Les guides, qui s'adressent à des spécialistes dans le domaine des déversements, sont conçus pour aider à planifier les interventions d'urgence et évaluer les incidences sur l'environnement.

Vu la grande quantité d'information présentée et le caractère très technique des guides, ces derniers ne s'adressent pas au personnel de première intervention, pour qui existent déjà des manuels plus appropriés.

L'information offerte a été glanée en majeure partie dans des publications déjà existantes. Les auteurs ont pris grand soin, aussi bien au stade de la compilation qu'à celui de la révision, de vérifier la justesse des éléments retenus. Néanmoins, il ne faut pas voir dans la publication de ces éléments d'information une forme de recommandation de la part du gouvernement du Canada ni de quelque autre groupe.

REMERCIEMENTS

La version définitive du présent guide est l'oeuvre du personnel du Service de la protection de l'environnement, qui a procédé à la refonte de nombreux passages du texte initial, ajouté maints renseignements et commentaires et préparé les schémas et les figures.

Le travail préliminaire avait été donné à contrat par Environnement Canada aux firmes M.M. Dillon Consulting Engineers and Planners, Concord Scientific Corporation et Waterloo Engineering Limited.

L'abondance de détails qu'on trouve dans le guide est le fruit de la collaboration de plusieurs personnes, organismes et institutions qui ont fourni des données et des conseils précieux, au stade de la compilation comme au stade de la rédaction. Sous ce rapport, le Sulphur Development Institute of Canada mérite des remerciements particuliers.

TABLE DES MATIÈRES

	Avant-propos	III
	Remerciements	III
	Liste des figures	VI
	Liste des tableaux	VI
	Abréviations et symboles	VII
	Définitions	IX
	Sigles	X
1	**Résumé**	1
2	**Propriétés physiques et chimiques**	4
3	**Production, transport et commerce**	10
3.1	Qualités et titres du produit	10
3.2	Fabricants situés au Canada	10
3.3	Itinéraires utilisés pour le transport	11
3.4	Volume de production	11
3.5	Fabrication industrielle	13
3.5.1	Information générale	13
3.5.2	Récupération du soufre	13
3.5.3	Procédé d'élaboration	13
3.6	Principales utilisations au Canada	14
3.7	Principaux acheteurs au Canada	14
4	**Manutention du produit et compatibilité**	15
4.1	Conteneurs et autres récipients de transport	15
4.1.1	Transport en vrac	15
4.1.1.1	Wagons	15
4.1.1.2	Véhicules routiers	16
4.2	Déchargement	19
4.2.1	Matériel et procédés de déchargement des wagons-citernes	19
4.2.2	Matériel et procédés de déchargement des véhicules-citernes routiers	21
4.2.3	Matériaux de fabrication et spécifications des organes de déchargement	21
4.3	Compatibilité du soufre et des matériaux de fabrication	22
5	**Fuite et migration du soufre**	28
5.1	Aperçu général	28
5.2	Fuite du soufre	28
5.2.1	Introduction	29
5.2.2	Nomogrammes de fuites	29
5.2.2.1	Pourcentage de liquide restant en fonction du temps d'écoulement	29
5.2.2.2	Débit de fuite en fonction du temps d'écoulement	29
5.2.3	Exemples de calcul	29
5.3	Diffusion atmosphérique	31
5.4	Comportement dans l'eau	31
5.5	Comportement dans le sous-sol: pénétration dans le sol	31
6	**Protection de l'environnement**	32
6.1	Limites maximales admissibles	32
6.1.1	Qualité de l'eau	32
6.1.2	Qualité de l'air	32
6.2	Toxicité pour les espèces aquatiques	32
6.2.1	Évaluation de la toxicité aux États-Unis	32
6.2.2	Mesures de toxicité	32
6.2.3	Étude du milieu aquatique	33
6.3	Toxicité pour d'autres organismes	33

6.3.1	Toxicité pour le bétail	33
6.3.2	Toxicité pour les plantes	34
6.3.3	Toxicité pour les insectes	34
6.3.4	Le soufre et la vie organique	34
6.4	Le soufre naturel dans l'air et à la surface du sol	35
6.5	Dégradation du soufre	35
6.5.1	Environnement aquatique	35
6.5.2	Persistance dans l'environnement	35
6.6	Devenir et effets à long terme	35
6.7	Effets dans le sol	35
6.7.1	Dégradation dans le sol	35
6.7.2	Effets sur le biote du sol	35
7	**Protection de la santé**	37
7.1	Normes d'exposition recommandées	37
7.2	Données sur les propriétés irritantes	37
7.2.1	Contact avec la peau	37
7.2.2	Contact avec les yeux	37
7.3	Seuil de perception des caractères organoleptiques	37
7.4	Études à long terme	37
7.4.1	Inhalation	37
7.4.2	Ingestion	38
7.5	Symptômes d'intoxication	38
7.5.1	Inhalation	38
7.5.2	Ingestion	38
7.5.3	Contact avec la peau	38
7.5.4	Contact avec les yeux	38
7.6	Toxicité pour l'homme des produits de décomposition ou de combustion du soufre	38
7.6.1	Sulfure d'hydrogène et dioxyde de soufre	38
8	**Compatibilité chimique**	39
8.1	Compatibilité du soufre et de divers corps chimiques	39
9	**Mesures d'intervention et de sécurité**	44
9.1	Mesures recommandées	44
9.1.1	Risques d'incendie ou d'explosion	44
9.1.2	Moyens d'extinction	44
9.1.3	Mesures d'intervention en cas de déversements	44
9.1.3.1	Information générale	44
9.1.3.2	Déversements sur le sol	44
9.1.3.3	Déversements dans l'eau	44
9.1.4	Nettoyage et traitement	45
9.1.4.1	Déversements dans l'eau	45
9.1.5	Élimination du polluant	45
9.1.6	Appareils et vêtements de protection	45
9.1.7	Précautions spéciales	45
10	**Cas de déversement accidentel**	46
10.1	Déraillement d'un train	46
11	**Identification et dosage des polluants**	47
11.1	Identification du soufre dans l'air, l'eau et le sol	47
11.2	Dosage du soufre élémentaire dans le sol ou les sédiments (analyses quantitatives)	47
12	**Références et bibliographie**	49
12.1	Références	49
12.2	Bibliographie	54

LISTE DES FIGURES

1 Masse volumique du liquide en fonction de la température 8
2 Viscosité du liquide en fonction de la température 8
3 Diagramme de phase 9
4 Wagon-tombereau typique 15
5 Wagon-citerne – classe 111A100W1 17
6 Déchargement d'un wagon-citerne 20
7 Perforation de la paroi inférieure d'un wagon-citerne 29
8 Pourcentage de liquide restant en fonction du temps d'écoulement 30
9 Débit de fuite en fonction du temps d'écoulement 30

LISTE DES TABLEAUX

1 Nomogrammes de conversion 7
2 Spécifications des wagons-tombereaux 16
3 Spécifications des wagons-citernes de classe 111A100W1 18
4 Compatibilité du soufre et de certains matériaux de fabrication 23

ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

adf	Antidéflagrant
atm	Atmosphère
c.f.	Coupelle fermée
c.o.	Coupelle ouverte
CPG	Chromatographie en phase gazeuse
d	Densité
d vap	Densité de vapeur
d.-v.	Demi-vie
D ext.	Diamètre extérieur
D int.	Diamètre intérieur
DAMM	Diamètre aérodynamique moyen en masse
DBO	Demande biochimique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
D_e	Diamètre d'entrée
DIF	Détecteur d'ionisation à flamme
DMM	Diamètre moyen en masse
DMN	Diamètre moyen en nombre
DMV	Diamètre moyen en volume
DPI	Détecteur à photo-ionisation
D_s	Diamètre de sortie
DL min.	Dose létale minimale
DL 50	Dose létale moyenne
et coll.	et collaborateurs
eV	Electronvolt
f. n. éq.	Fumée normalisée équivalente
gal imp.	Gallon impérial
IDLH	*Immediately Dangerous to Life or Health*
IR	Infrarouge
j	jour
J	Joule
K	Coefficient de perméabilité
l	litre
L.I.E.	Limite inférieure d'explosibilité
L.I.I.	Limite inférieure d'inflammabilité
L.S.E.	Limite supérieure d'explosibilité
L.S.I.	Limite supérieure d'inflammabilité
m	Masse
MAK	Teneur maximale admissible (norme établie par la RFA)
MAK-K	Teneur maximale admissible (norme établie par la RDA)
MAK-D	Teneur maximale admissible – courte durée (norme établie par la RDA)
max.	Maximum
mé/l	Milliéquivalent par litre
MIK	Teneur maximale d'immission (norme établie par la RDA)
min.	Minimum
mn	Minute
M mol.	Masse molaire
M vol.	Masse volumique
mol	Mole
MPT	Moyenne pondérée en fonction du temps
N	Newton
Pa · s	Pascal seconde
pds éq.	Poids équivalent
ppb	Parties par milliard (10^{-9})
ppm	Parties par million (10^{-6})
ppt	Parties par mille (10^{-3})
psi	*Pounds per square inch*
P	Pression
P_c	Pression critique
PEL	*Permissible Exposure Limit*
Po	Poise
Pt cong.	Point de congélation
Pt déf.	Point de déflagration
Pt dét.	Point de détonation
Pt ébul.	Point d'ébullition
Pt écl.	Point d'éclair
Pt écoul.	Point d'écoulement
Pt fus.	Point de fusion
Pt liq.	Point de liquéfaction
PVC	Chlorure de polyvinyle
q	Débit
q_e	Débit d'entrée
q_f	Débit de fuite
q_m	Débit-masse
q_s	Débit de sortie
q_v	Débit-volume
std	Standard
SM	Spectroscopie de masse
St	Stokes
STEL	*Short Term Exposure Limit*
t	Tonne
t	Temps
temp.	Température
$Temp_c$	Température critique
TE 50	Teneur efficace moyenne
tf	Tonne forte
TI 50	Teneur inhibitrice moyenne
TLm	Tolérance moyenne
TL min.	Teneur létale minimale
TL 50	Teneur létale moyenne
TLV®	*Threshold Limit Value*
TLV®C	*Threshold Limit Value-Ceiling*
TPN	Température et pression normales
TT min.	Teneur toxique minimale
u	Vitesse du vent

μ	Viscosité
vap	Vapeur
vol.	Volume
V	Vitesse d'écoulement
V biod.	Vitesse de biodégradation
V évap.	Vitesse d'évaporation
^{o}Bé	Degré Baumé
^{o}C	Degré Celsius
φ	Diamètre
x	Distance sous le vent
~~W~~	Ne pas utiliser d'eau comme moyen d'extinction

DÉFINITIONS

Les définitions figurant ci-dessous valent pour la collection «Enviroguide». Le lecteur notera qu'elles n'ont pas toujours une portée générale. Pour plus de détails, ou pour d'autres définitions, se reporter au manuel d'introduction de la collection.

Bio-accumulation. – Rétention sans cesse croissante d'une substance dans les tissus d'un organisme tout au long de son existence (le facteur de bioconcentration augmentant sans cesse).

Bio-amplification. – Rétention d'une substance dans les tissus à des teneurs de plus en plus élevées au fur et à mesure que l'on s'élève dans la hiérarchie des organismes de la chaîne alimentaire.

Bioconcentration. – Rétention d'une substance dans les tissus d'un organisme au point que la teneur des tissus en cette substance surpasse la teneur du milieu ambiant en cette substance, à un moment donné de la vie de cet organisme.

Concentration. – Comme ce mot a des sens multiples et parfois mal définis selon qu'il s'agit de chimie, de biologie ou d'écologie, on lui a préféré des termes jugés plus précis, tels titre, teneur et bioconcentration.

Contaminant. – Polluant qui figure sur une liste de produits dangereux, établie en vertu de la Loi sur les contaminants de l'environnement.

Dose létale minimale. – Dans le cas de la toxicité pour l'homme (la dose définie ici peut être extrapolée à l'homme), il s'agit de la plus faible dose (autre que la DL 50) d'une substance dont l'absorption, excluant l'inhalation, en une ou plusieurs prises, au bout d'un temps donné, a été signalée comme cause de la mort d'un animal ou d'une personne. Abrév. DL min.

Dose létale moyenne (1). – Dans le cas de la toxicité pour l'animal, il s'agit de la dose qui tue, au bout d'un temps donné, 50 p. 100 des animaux auxquels on a fait absorber une certaine quantité de substance. Abrév. DL 50.

Dose létale moyenne (2). – À des fins de comparaison ou d'extrapolation dans l'étude de la toxicité pour l'homme, il s'agit de la dose (calculée) d'une substance censée entraîner, au bout d'un temps donné, la mort de 50 p. 100 d'une population homogène d'animaux. Elle est déterminée par suite de l'absorption, excluant l'inhalation, d'une quantité de cette substance par un lot statistiquement significatif d'animaux provenant de cette population. Abrév. DL 50.

Dose toxique minimale. – La plus faible dose d'une substance, introduite par toute autre voie que l'inhalation, pendant quelque période de temps que ce soit, dont l'absorption a été signalée comme cause d'effet toxique chez des personnes ou d'effets carcinogènes, néoplastogènes ou tératogènes chez les animaux ou les personnes. Abrév. DT min.

Facteur de bioconcentration. – Rapport de la teneur en une substance des tissus d'un organisme exposé (moins la teneur des tissus d'un organisme témoin) à la teneur en cette substance du milieu ambiant.

IDLH *(Immediately Dangerous to Life or Health).* – Teneur plafond à laquelle, dans un délai maximal d'exposition de 30 minutes, il est possible à une personne de fuir les lieux exposés sans qu'il n'y ait manifestation de signes fonctionnels d'intoxication, perturbation irréversible de la santé ou décès. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par le NIOSH.

Immission. – Transfert d'un polluant de l'atmosphère vers un «récepteur» qui peut être une personne, un animal, une plante. La teneur maximale d'immission, mentionnée au chapitre 7, se rapporte au polluant retenu dans les poumons. Il s'agit d'un concept d'origine allemande, adopté par l'ISO.

Létal. – En toxicologie, synonyme de mortel.

MAK *(Maximale Arbeidsplatz Konzentration).* – Teneur limite moyenne admissible en milieu de travail, compte tenu de semaines de 45 heures et de journées de 8 heures. Il s'agit d'une norme établie par la RFA.

MAK-D. – Teneur limite moyenne admissible en milieu de travail, compte tenu de semaines de 45 heures et de journées de 8 heures. Il s'agit d'une norme établie par la RDA.

MAK-K. – Teneur limite admissible en milieu de travail pour une période très courte ne dépassant pas 30 minutes. Il s'agit d'une norme établie par la RDA.

PEL *(Permissible Exposure Limit).* – Teneur limite moyenne (pondérée en fonction du temps) à laquelle peuvent être exposés des travailleurs pendant une période de relève. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par le NIOSH.

Polluant. – Agent physique, chimique ou biologique qui provoque une dégradation dans un milieu donné.

STEL (TLV – *Short Term Exposure Limit*). –Teneur limite à laquelle les travailleurs peuvent être exposés de façon continue pour une courte période sans souffrir d'irritation, de dommage irréversible aux tissus ou d'une narcose suffisamment grave pour accroître la probabilité de blessure par accident, diminuer la capacité de fuir ou réduire physiquement l'efficacité au travail, en prenant pour acquis que la TLV quotidienne n'a pas été dépassée. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par l'ACGIH.

Teneur. – Quantité de matière solide, liquide ou gazeuse, rapportée à une masse ou à un volume d'autres matières dans lesquelles elle est en mélange, suspension ou dissolution.

Teneur efficace moyenne. – Dans le cas de la toxicité pour la micro-faune, il s'agit de la teneur à laquelle se produit, chez 50 p. 100 de la population, pour une durée d'exposition donnée, un effet tel que l'immobilisation, la perte de l'équilibre, une déficience de croissance ou même la mort. Abrév. TE 50.

Teneur inhibitrice moyenne. – Dans le cas de la toxicité pour la micro-flore ou la micro-faune, il s'agit de la toxicité qui inhibe à 50 p. 100 une activité biologique (par exemple, la croissance) en un temps déterminé. Abrév. TI 50.

Teneur létale minimale. – Dans le cas de la toxicité pour l'homme (la teneur définie ici peut être extrapolée à l'homme), il s'agit de la plus faible teneur (autre que la TL 50) de l'air en une substance dont l'inhalation a été signalée comme cause de la mort d'un animal ou d'une personne. Abrév. TL min.

Teneur létale moyenne (1). – Dans le cas de la toxicité pour l'animal, il s'agit de la teneur à laquelle meurent, au bout d'un temps donné, 50 p. 100 des animaux auxquels on a fait absorber une certaine quantité de substance. Abrév. TL 50.

Teneur létale moyenne (2). – À des fins de comparaison ou d'extrapolation dans l'étude de la toxicité pour l'homme, il s'agit de la teneur (calculée) de l'air en une substance dont l'inhalation est censée provoquer, au bout d'un temps donné, la mort de 50 p. 100 d'une population homogène d'animaux. Elle est déterminée par suite de l'exposition d'un lot statistiquement significatif d'animaux provenant de cette population. Abrév. TL 50.

Teneur plafond. – Teneur maximale admissible établie pour une durée d'exposition bien déterminée, dans le cas d'une substance très toxique. (L'IDLH et la TLV®-C sont des teneurs plafonds.)

Teneur toxique minimale. – La plus faible teneur de l'air en une substance à laquelle des personnes ou des animaux ont été exposés, pour quelque période de temps que ce soit, sans qu'il y ait eu d'effet toxique chez les personnes ou d'effets carcinogènes, néoplastogènes ou tératogènes chez les animaux ou les personnes. Abrév. TT min.

Titre (d'une solution, en chimie). – Rapport de la masse d'une substance dissoute à la masse totale ou du nombre de moles d'un constituant au nombre total de moles.

TLV® *(Threshold Limit Value).* – Teneur limite moyenne (pondérée en fonction du temps) à laquelle la majorité des travailleurs peuvent être exposés régulièrement à raison de 8 heures par jour, 5 jours par semaine, sans subir d'effet nocif. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par l'ACGIH.

TLV®-C *(Threshold Limit Value-Ceiling).* – Teneur limite admissible pour un moment donné. Il s'agit d'une valeur plafond définie et déterminée par l'ACGIH.

Tolérance moyenne. – Niveau de tolérance correspondant à la teneur à laquelle 50 p. 100 des sujets d'un test survivent au bout d'un temps donné. Abrév. TLm.

SIGLES

ACGIH	American Conference of Government Industrial Hygienists
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWQC	Ambient Water Quality Criteria (USA)
AWWA	American Water Works Association
CBG	Chemical Buyers' Guide (USA)
CCD	Condensed Chemical Dictionary (USA)
CCPA	Canadian Chemical Producers Association
CCT	Commission canadienne des transports
CHRIS	Chemical Hazards Response Information System (USA)
EPA	Environmental Protection Agency (USA)
ITII	International Technical Information Institute (Japon)
MCA	Manufacturing Chemists Association (USA)
MDT	Ministère des Transports (du Canada)
NACE	National Association of Corrosion Engineers (USA)
NAS	National Academy of Sciences (USA)
NFPA	National Fire Protection Association (USA)
NIOSH	National Institute of Occupational Safety and Health
NRC	National Research Council (USA)
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (USA)

1 RÉSUMÉ

Soufre (S_8)

Le soufre se présente à l'état solide en poudre, granules, grains et boulettes jaunes. À l'état liquide, sa couleur passe du jaune-orange au rouge-brun (selon le degré de température).

Synonymes
Bensulfoide, Colsul, Crystex, fleur de soufre, soufre colloïdal, soufre natif.

Numéros d'identification
UN 1350 (à l'état solide); UN 2448 (à l'état liquide); CAS 7704-34-9; OHM-TADS 7216913.

Qualités
Soufre à l'état naturel, épuré, de qualité commerciale et chimiquement pur.
Étiquette d'identification non obligatoire.

Dangers immédiats
Incendie. – Le soufre est combustible et émet au moment de sa combustion un gaz toxique, l'anhydride sulfureux. La poussière de soufre peut exploser en présence d'une source d'inflammation. Le soufre peut avoir une réaction violente au contact d'oxydants ou de métaux en poudre. La présence de sulfure d'hydrogène multiplie le risque d'incendie.
Effet sur l'homme. – Le soufre élémentaire est peu toxique. En feu, il dégage un gaz toxique, l'anhydride sulfureux. La fusion de soufre à l'état naturel peut dégager du sulfure d'hydrogène à cause de la présence et de la décomposition de mercaptans.
Effet sur l'environnement. – Des teneurs élevées en soufre à l'état de matières en suspension peuvent nuire à la vie aquatique.

Données relatives aux propriétés physiques

État (15 °C; 1 atm)	Solide
Point d'ébullition	444,6 °C
Point de fusion	112,8 °C à 120 °C
Inflammabilité	Combustible
Point d'éclair	168 °C – 261 °C
Densité relative (eau = 1)	1,79 à 138 °C (liquide) 2,07 à 20 °C (après fusion)
Solubilité (dans l'eau)	Insoluble
Comportement (dans l'eau)	Descend généralement au fond; le soufre en poudre peut avoir tendance à flotter
Seuil de perception par l'appareil olfactif	Le soufre pur est inodore; les qualités commerciales peuvent dégager une odeur de sulfure d'hydrogène

Dangers pour l'environnement
De fortes teneurs en soufre élémentaire peuvent constituer un danger sérieux, spécialement à l'état colloïdal. La couverture de fond des cours d'eau est également vulnérable: le soufre en fusion se solidifiera, coulera au fond et menacera la vie présente au fond. Il ne présente toutefois aucun danger de bio-accumulation ou de concentration le long de la chaîne alimentaire. Le soufre élémentaire s'oxyde lentement dans l'eau, générant des conditions acides (probablement un mélange d'acides sulfureux et sulfurique).

Dangers pour l'homme

Effets en cas d'inhalation. – La poussière de soufre peut irriter les muqueuses des voies respiratoires ainsi que l'intérieur des paupières.

Effets en cas de contact. – Une exposition répétée à la poussière de soufre peut provoquer une irritation de la peau. Le port de vêtements contaminés par le soufre occasionne des picotements et des rougeurs. Le soufre fondu peut causer des brûlures graves.

Effets en cas d'ingestion. – Le soufre est peu toxique. Son usage en pharmacie comme laxatif et parasiticide est bien connu.

Dispositions immédiates à prendre

• En cas de déversement

Interdire l'accès aux lieux où s'est produit l'accident. Signaler: «Produit combustible». Appeler les pompiers et avertir le fabricant. Arrêter l'écoulement et confiner le produit déversé si cela ne présente aucun risque. Éviter tout contact avec le produit ou l'inhalation de la poussière qui s'en dégage.

• En cas d'incendie

Éteindre le feu à l'aide d'un jet d'eau pulvérisé, d'un extincteur à poudre sèche, d'une mousse extinctrice ou de sable. Éviter d'utiliser un jet d'eau plein susceptible d'éparpiller le soufre fondu et la poussière de soufre.

Mesures d'intervention d'urgence

• Soufre répandu sur le sol

Si le soufre déversé est à l'état liquide ou à l'état solide, construire des barrages pour le contenir. La poussière de soufre peut être confinée en gardant humide la surface exposée.

Soufre à l'état solide. – Ramasser le soufre à la pelle et mettre dans des contenants munis d'un couvercle pour sa récupération ou son élimination ultérieures. Si le soufre est humide, de la chaux devra être ajoutée pour neutraliser tout acide qui aurait pu se former par réaction au contact de l'eau ou d'impuretés.

Soufre à l'état liquide (fondu). – Laisser le produit se solidifier, le ramasser à la pelle et le mettre, une fois refroidi, dans des contenants munis d'un couvercle.

Nettoyer les lieux de l'accident à l'eau et couvrir de pierres à chaux. Ramasser le produit pour la récupération.

• Soufre déversé dans l'eau

Confiner l'eau polluée au moyen de barrages ou d'un dispositif de dérivation. Enlever le produit solidifié et le précipité à l'aide d'un appareil aspirateur ou de dragues mécaniques.

Niveau de gravité du risque du soufre fondu selon la NAS (étatsunienne)

(Catégorie)	(Niveau)
Incendie	1 à 3
Santé	
Irritation causée par des vapeurs	1
Irritation causée par le produit à l'état liquide ou solide	1
Intoxications	1

Évaluation du risque du soufre à l'état solide selon la NFPA

S'il n'y a pas incendie

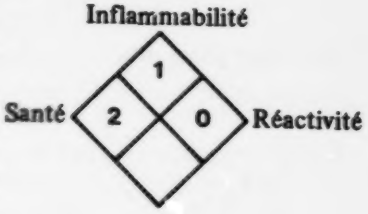
Pollution de l'eau

- Toxicité pour l'homme 0
- Toxicité pour les espèces vivantes du milieu aquatique 1
- Atteinte à l'esthétique de l'environnement 1

Réactivité

- Autres produits chimiques 4
- Eau 0
- Réaction spontanée 0

S'il y a incendie



Remarque: Champ inférieur vide: utiliser de l'eau comme moyen d'extinction

2 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

Propriétés physiques	
Aspect	Solide jaune. Le soufre fondu a l'aspect d'un liquide jaune à orange rougeâtre ou brun
État à l'expédition	À l'état solide, Sα: cristaux rhombiques (forme prédominante) À l'état liquide: le soufre fondu (Ashland MSDS) est maintenu liquide à des températures de 149 °C à 154 °C (CE, 1978)
État physique (15 °C; 1 atm)	À l'état solide, en cristaux rhombiques ou monocliniques ou sous forme amorphe (CRC, 1980; Kirk-Othmer, 1979)
Point de fusion	Plage générale: 110 °C à 119 °C (Meyer, 1977) Sα: 112,8 °C (CRC, 1980) Sβ: 119,0 °C (CRC, 1980) Sγ: 106,8 °C (Cotton, 1972)
Point de congélation	115 °C (MCA, 1959)
Point d'ébullition	444,6 °C (CRC, 1980)
Densités	
Masse volumique	À l'état liquide: 1790 kg/m^3 à 138 °C (MCA, 1959)
Densité globale	En boulettes: 1090 kg/m^3 à 1200 kg/m^3 (SUDIC, 1983) À l'état solide: 1201 kg/m^3 à 1394 kg/m^3 (forme non spécifiée) (MCA, 1959)
Densité relative	Sα: 2,07 à 20 °C (CRC, 1980) Sβ: 1,96 à 20 °C (CRC, 1980) Sγ: 1,92 à 20 °C (CRC, 1980) À l'état liquide: 1,79 à 138 °C (MCA, 1959)
Propriétés relatives à la combustion	
Inflammabilité	Combustible (tout état). Forme des mélanges inflammables et(ou) explosifs au contact de l'air (en poudre, en particules dispersées)
Point d'éclair	248 °C à 261 °C (CE, 1978) 168 °C à 188 °C (Meyer, 1977) 207 °C (NFPA, 1978) 188 °C (MCA, 1959) 248 °C à 261 °C (Meyer, 1977)
Température d'inflammation spontanée dans l'air (à l'état liquide)	
Température d'inflammation spontanée (à l'état solide)	En particules dispersées dans l'air: 190 °C (MCA, 1959; Meyer, 1977)

	En particules non dispersées: 220 °C (Meyer, 1977)
Limite supérieure d'explosibilité	232 °C (NFPA, 1978) 1400 g/m^3 (MCA, 1959) En particules dispersées dans l'air: 1400 g/m^3 (Meyer, 1977)
Limite inférieure d'explosibilité	2000 g/m^3 (Orchard, 1982) 35 g/m^3 (MCA, 1959) À l'état de poussières (Ashland MSDS) 25,1 g/m^3 (Meyer, 1977)
Caractéristiques de la combustion	Brûle avec une flamme bleu pâle (CHRIS, 1978)
Chaleur de combustion (à l'état solide)	9254 kJ/kg (Meyer, 1977) En cristaux monocliniques: 9378 kJ/kg (CRC, 1983) En cristaux rhombiques: 9211 kJ/kg (CRC, 1983)
Produit de la combustion	Anhydride sulfureux
Explosibilité	La poussière ou la vapeur de soufre forment des mélanges explosifs avec l'air (NFPA, 1978)
Autres propriétés	
Masse atomique relative	32,06 (CRC, 1982)
Masse moléculaire relative de la substance pure (S_8)	265,512 (CRC, 1980)
Composition caractéristique de la qualité commerciale	99,9 p. 100 de soufre fondu ou liquide (SUDIC, 1983)
Résistivité	1,9 x 10^{17} Ω · cm à 20 °C (Kirk-Othmer, 1969)
Indice de réfraction	Sα: 1,957 (CRC, 1980) Sβ: 2,038 (CRC, 1957)
Viscosité (à l'état liquide)	11 mPa · s à 123 °C (CRC, 1982) 23 mPa · s à 160 °C (CRC, 1982)
Tension superficielle avec l'air	À l'état liquide à 120 °C: 0,061 N/m (Kirk-Othmer, 1979)
Tension interfaciale avec l'eau	À l'état liquide à 127 °C: 0,05 N/m (CHRIS, 1978)
Chaleur latente de fusion	Sα: 49,8 J/g à 112,8 °C (Kirk-Othmer, 1979) Soufre mono-atomique: 38,5 J/g à 118,9 °C (CRC, 1982)
Chaleur latente de vaporisation	290 J/g à 440 °C (Kirk-Othmer, 1979)
Chaleur de formation	Sβ; 0,33 kJ/mol à 25 °C (NBS, 1982) S à l'état gazeux: 278,8 kJ/mol à 25 °C (NBS, 1982) S_8 à l'état gazeux: 102,3 kJ/mol à 25 °C (NBS, 1982)
Potentiel d'ionisation	S_8: 9,04 eV (Rosenstock, 1977)
Chaleur massique à pression constante	S à l'état liquide à 120 °C: 961,5 J/kg · K) (Kirk-Othmer, 1979)

	Sα à 24,9 °C: 710,9 J/kg · K) (Kirk-Othmer, 1979)
Énergie molaire	Estimée à 98,6 J/mol (JANAF, 1971: CHRIS, 1978)
Température critique	1040 °C (Kirk-Othmer, 1979)
Pression critique	11 750 kPa (Kirk-Othmer, 1979)
Coefficient de dilatation linéique	Sα, de 13 °C à 50 °C: $7,4 \times 10^{-5}$/°C (Kirk-Othmer, 1979)
Coefficient de dilatation volumique	De 13,2 °C à 50,3 °C: $2,23 \times 10^{-4}$/°C (CRC, 1957)
Conductivité thermique	À l'état solide polycristallin à 25 °C: $2,7 \times 10^{-3}$ W/(cm · K) (CRC, 1982)
	À l'état solide – amorphe à 25 °C: $2,05 \times 10^{-3}$ W/(cm · K) (CRC, 1982)
	À l'état liquide à 119 °C: $1,29 \times 10^{-3}$ W/(cm · K) (CRC, 1982)
Solubilité	
• dans l'eau	Insoluble (Kirk-Othmer, 1979)
• dans d'autres produits courants	Sα est soluble dans le sulfure de carbone et le tétrachlorure de carbone; légèrement soluble dans le toluène, l'alcool, le benzène, l'éther et l'ammoniac liquide (CRC, 1982)

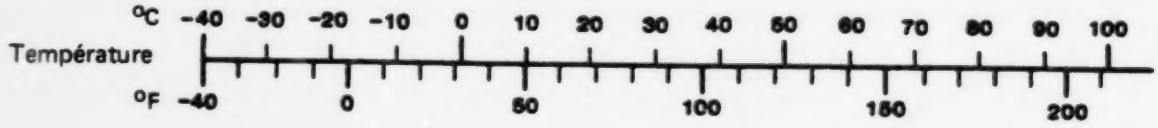
Propriétés de constitution

À l'état solide, le soufre forme de grosses molécules cycliques S_8, composées de huit atomes. Ces molécules cristallisent dans trois variétés allotropiques de soufre. La variété orthorhombique (ou octaédrique) de soufre, Sα, est la forme thermodynamiquement la plus stable. Sα fond à 112,8 °C; toutefois, à 95,8 °C, il se transforme en Sβ, la forme monoclinique (ou prismatique) de soufre, qui fond à 119 °C. Chauffé rapidement Sα peut fondre sans se transformer en Sβ. À la pression atmosphérique, la transformation $S\alpha \rightleftharpoons S\beta$ est réversible et a lieu à 95,6 °C. D'autres variétés monocliniques ont été identifiées au microscope, mais celles-ci ne peuvent être obtenues qu'à l'aide de procédés spéciaux. Une de ces dernières est la variété Sγ, qui fond à 106,8 °C et qui peut se retransformer lentement en Sβ et(ou) en Sα. Il est possible d'obtenir d'autres états moléculaires comportant plus ou moins d'atomes, mais ces états sont tous instables dans des conditions normales. Le soufre fondu est fluide jusqu'à 150 °C, on l'appelle Sλ. Au-dessus de 150 °C, il y a rupture des anneaux S_8 et formation de chaînes S_8, et par conséquent production de la variété Sπ. Il se produit un changement de couleur, du jaune clair au brun, et la viscosité augmente jusqu'à 190 °C puis diminue par suite de la fragmentation des chaînes. Si la température augmente encore, les molécules S_8 commencent à se polymériser, engendrant les variétés Sμ. Si on refroidit brutalement un soufre liquide comportant une forte proportion de Sμ, on obtient un soufre mou, élastique à la manière du caoutchouc. Le point d'ébullition du soufre est de 444,6 °C. À cette température le soufre est un liquide rouge foncé, presque noir, et il y a coexistence de chaînes assez courtes et d'anneaux S_8. La vapeur de soufre n'est pas stable et passe successivement par les états S_8, S_6, S_4, S_2.

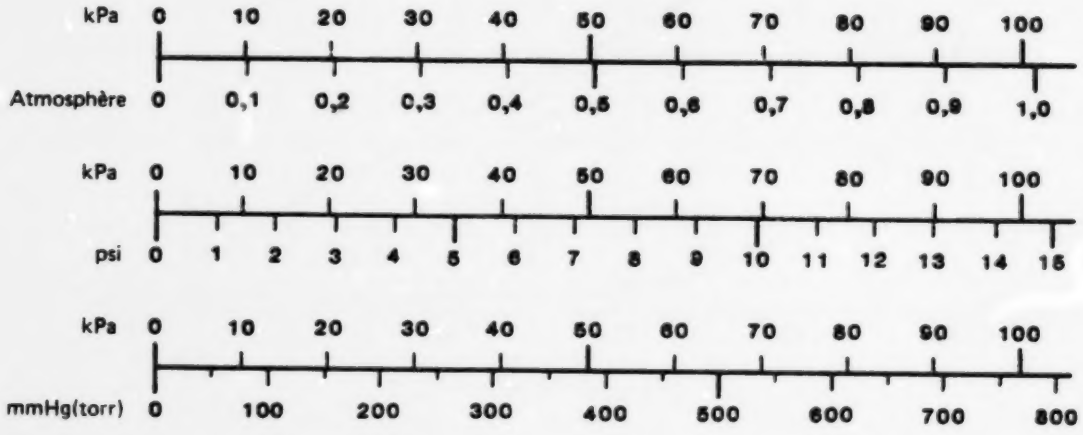
Tableau 1

SOUFRE

NOMOGRAMMES DE CONVERSION



Pression 1 kPa = 1 000 Pa



Viscosité

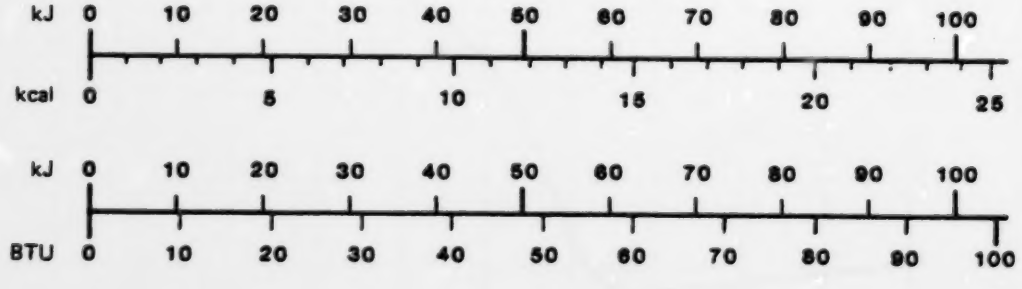
Dynamique 1 Pa·s = 1 000 centipoises (cP)

Cinématique 1 m^2/s = 1 000 000 centistokes (cSt)

Teneur (de l'eau)

1 ppm ≅ 1 mg/l

Énergie (chaleur) 1 kJ = 1 000 J



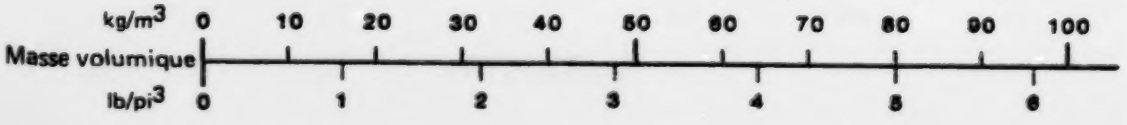


Figure 1

SOUFRE — **MASSE VOLUMIQUE DU LIQUIDE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE**

Référence: CRC, 1980

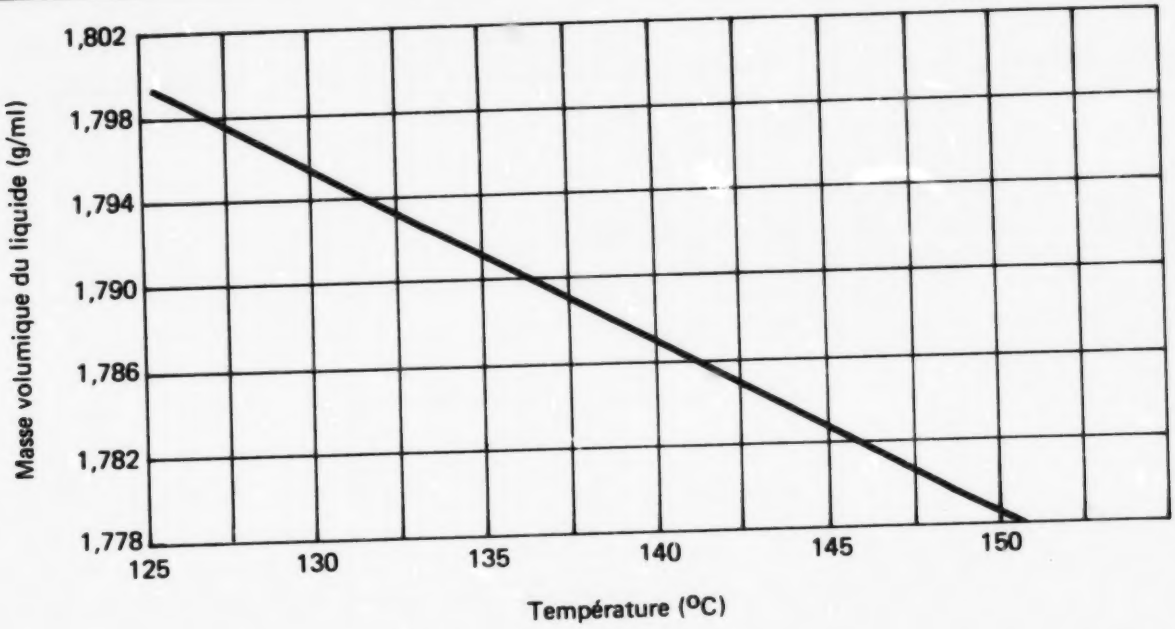


Figure 2

SOUFRE — **VISCOSITÉ DU LIQUIDE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE**

Référence: CRC, 1980

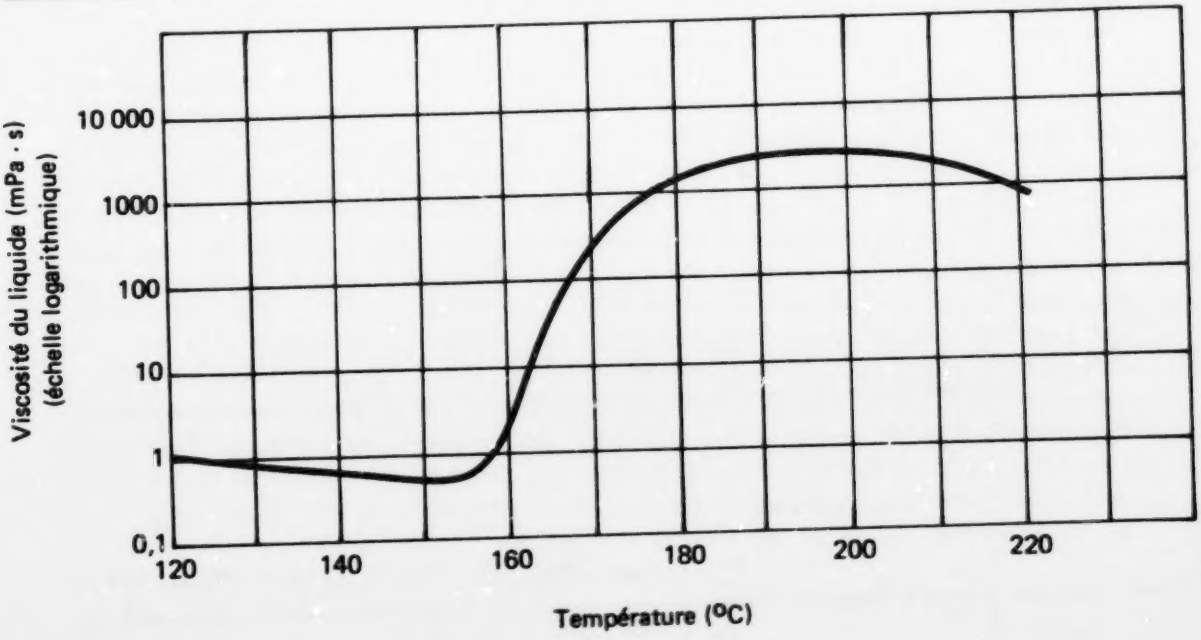
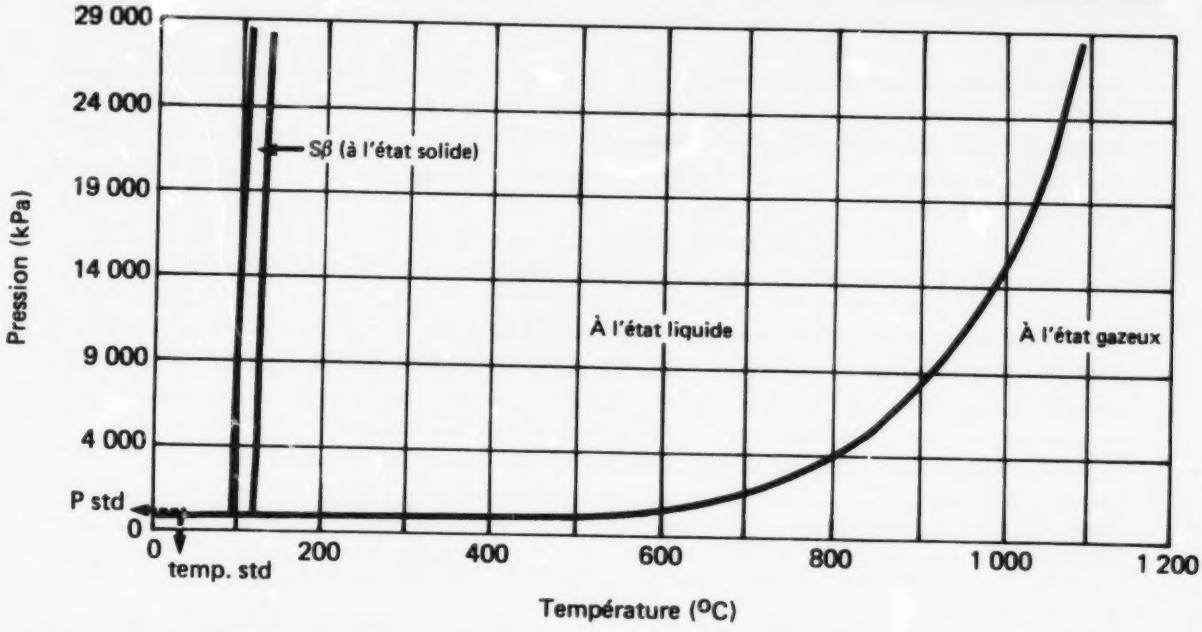


Figure 3

SOUFRE

DIAGRAMME DE PHASE



3 PRODUCTION, TRANSPORT ET COMMERCE

3.1 Qualités et titres du produit

Le soufre est vendu au Canada à l'état solide en feuilles, en granules et en boulettes ainsi qu'à l'état liquide (fondu). Les feuilles ont environ 0,64 cm à 1,3 cm d'épaisseur, 3 cm à 6 cm de largeur; leur longueur varie d'un fabricant à l'autre. On avait prévu qu'avant la fin de 1981, approximativement 60 p. 100 du soufre serait exporté à l'état solide, soit en granules ou en boulettes (CMI, 1980).

3.2 Fabricants situés au Canada (CBG, 1980; DNACP, 1979; SUDIC, 1983)

Le lecteur trouvera ci-dessous des adresses de sièges sociaux. Il faudrait noter qu'elles ne sont pas fournies dans le but qu'on s'en serve comme premier recours en cas de déversement accidentel.

Amerada Minerals Corporation of Canada Ltd., 540 Fifth Avenue S.W., Calgary, Alberta, T2P 0M3, (403) 267-6910

Amoco Canada Petroleum Co. Ltd., 444 Seventh Avenue S.W., Calgary, Alberta, T2P 0Y2, (403) 233-1313

Canterra Energy Ltd., 505 Fifth Street S.W., P.O. Box 1051, Calgary, Alberta, T2P 2K7, (403) 267-9111

Canadian Superior Oil Ltd., 3 Calgary Place, 355 Fourth Avenue S.W., Calgary, Alberta, T2P 0J3, (403) 267-4110

Chevron Canada Ltd., 1500 1050 West Pender Street, Vancouver, Colombie-Britannique, V6C 3T4, (604) 681-4271

Chevron Canada Resources Ltd., 500 Fifth Avenue S.W., Calgary, Alberta, T2P 0L7, (403) 262-0500

Cominco Limited, 200 Granville Street, Vancouver, Colombie-Britannique, V6C 2R2, (604) 682-0611

Dome Petroleum Ltd., 330 Seventh Avenue S.W., P.O. Box 200, Calgary, Alberta, T2P 2Z1, (403) 260-5100

Esso Resources Canada Limited, Esso Plaza, 237 Fourth Avenue S.W., Calgary, Alberta, T2A 0H6, (403) 237-3737

Gulf Canada Ltd., 130 Adelaide Street W., Toronto, Ontario, M5H 3P5, (416) 869-8600

Home Oil Co. Limited, 2300 Home Oil Tower, 324 Eighth Avenue S.W., Calgary, Alberta, T2P 2Z5, (403) 232-7100

Husky Oil Ltd., 505 Fifth Street S.W., 19th Floor, P.O. Box 6525, Station D, Calgary, Alberta, T2P 3G7, (403) 267-6111

Imperial Oil Ltd., 111 St. Clair Avenue West, Toronto, Ontario, M5W 1K3, (416) 968-4111

Inco Metals, Inco Ltd., 1 First Canadian Place, P.O. Box 44, Toronto, Ontario, M5X 1C4, (416) 361-7511

Irving Oil Ltd., Refining Division, P.O. Box 1260, Saint-Jean, Nouveau-Brunswick, E2L 4H6, (506) 652-7710

Maynard Exploration Company, 2319 Sun Oil Bldg., 500 Fourth Avenue S.W., Calgary, Alberta, T2P 2V6, (403) 269-4993

Mobil Oil Canada Ltd., Mobil Tower, 330 Fifth Avenue S.W., P.O. Box 800, Calgary, Alberta, T2P 2J7, (403) 268-7910

Norcen Energy Resources Ltd., 4600 Toronto Dominion Centre, Toronto, Ontario, M3K 1E5, (416) 866-4000

Pan Canadian Petroleum, Pan Canadian Plaza, 150 Ninth Avenue S.W., P.O. Box 2850, Calgary, Alberta, T2P 2S5, (403) 290-2000

Pétro-Canada, P.O. Box 2844, Calgary, Alberta, T2P 2M7, (403) 296-8000

Petrofina Canada Ltd., Édifice de la Banque Royale du Canada, 1, place Ville-Marie, C.P. 3006, Station B, Montréal, Québec, H3B 4A9, (514) 866-3911

Petrogas Processing Ltd., 1600 McFarland Tower, 700 Fourth Avenue S.W., Calgary, Alberta, T2P 3J5, (403) 234-6700

Saratoga Processing Co. Ltd., 1212 Palliser Square East, 125 Ninth Avenue S.E., Calgary, Alberta, T2G 0P6, (403) 262-4561

Shell Canada Ltd., 505 University Avenue, Toronto, Ontario, M5G 1X4, (416) 597-7111

Sulconam Inc., 11450 rue Cherrier, Montréal Est, Québec, H1B 1A6, (514) 645-1636
Sulpetro of Canada Ltd., 3200 Bow Valley Square III, 255 Fifth Avenue S.W., Calgary, Alberta, T2P 3G6, (403) 232-1500
Suncor Inc., Sunoco Group Offices, 56 Wellesley Street West, Toronto, Ontario, M5S 2S4, (416) 924-4111
Syncrude Canada Ltd., 10030-107 Street Edmonton, Alberta, T5J 3E5, (403) 429-9110
Texaco Canada Inc., 90 Wynford Drive, Don Mills, Ontario, M3C 1K4, (416) 443-7811
Westcoast Transmission Co. Ltd., 1333 West Georgia Street, Vancouver, Colombie-Britannique, V6E 3K9, (604) 682-4411
Western Decalta Petroleum (1977) Limited, 734 Seventh Avenue S.W., 9th Floor, P.O. Box 2404, Calgary, Alberta, T2P 2M7, (403) 294-5566

3.3 Itinéraires utilisés pour le transport

Les Centres de production et les utilisateurs de soufre sont répartis dans neuf provinces du Canada. L'Alberta produit à elle-seule 90 p. 100 du soufre canadien. Le transport du soufre à l'état solide et du soufre à l'état liquide (fondu) se fait en wagon ou en camion. Le soufre à l'état liquide est habituellement réservé au marché domestique et est transporté en camion-citerne. Le soufre à l'état solide (en feuilles, granules et boulettes), vendu à l'étranger, est expédié par bateau à partir des ports de Vancouver et de Prince-Rupert, en Colombie-Britannique, et de Thunder Bay, en Ontario. Il est acheminé vers les installations portuaires par chemin de fer. La production canadienne de soufre s'élève à 850 000 tonnes par année, dont la moitié est utilisée en Alberta dans la fabrication de fertilisants.

3.4 Volume de production (Corpus, 1982)

Société	Ville	Province	Capacité nominale, en kilotonnes/an (1982)
Amerada Mineral	Olds	Alberta	140
Amoco	Bigstone Creek	Alberta	140
Amoco	East Crossfield	Alberta	640
Amoco/Canterra	Windfall	Alberta	430
Canadian Superior Oil	Harmattan	Alberta	180
Canadian Superior Oil	Lone Pine Creek	Alberta	57
Canterra Energy	Okotoks	Alberta	167,5
Canterra Energy	Rainbow Lake	Alberta	50
Canterra Energy	Ram River	Alberta	1670
CDC Oil & Gas	Brazeau River	Alberta	15,5
CDN Occidental Petroleum	Paddle River	Alberta	7,1
Chevron Canada	Burnaby	Colombie-Britannique	3,5
Chevron Standard	Kaybob	Alberta	1285
Chevron Standard	Nevis	Alberta	95
Chiefton Development	Sinclair	Alberta	90
Cominco	Trail	Colombie-Britannique	40
Consumer's Coop. Ref.	Regina	Alberta	7,2
Dome Petroleum	Brazeau River	Alberta	40,2
Dome Petroleum	Caroline	Alberta	8
Dome Petroleum	Edson	Alberta	103,5
Dome Petroleum	Kaybob South I	Alberta	388
Dome Petroleum	Kaybob South II	Alberta	388

Société	Ville	Province	Capacité nominale, en kilotonnes/an (1982)
Dome Petroleum	Lone Pine Creek	Alberta	103
Dome Petroleum	Sturgeon Lake S.	Alberta	27
Esso Resources	Joffre	Alberta	6,2
Esso Resources	Quirk Creek	Alberta	109,5
Esso Resources	Redwater	Alberta	12
Gulf Canada	Clarkson	Ontario	15
Gulf Canada	Edmonton	Alberta	37,5
Gulf Canada	Hanlan-Robb	Alberta	251
Gulf Canada	Nevis	Alberta	108,5
Gulf Canada	Pincher Creek	Alberta	58,5
Gulf Canada	Port Moody	Colombie-Britannique	9
Gulf Canada	Rimbey	Alberta	121,5
Gulf Canada	Strachan	Alberta	344
Home Oil	Carstairs	Alberta	26,5
Hudson's Bay Oil & Gas	Zama	Alberta	27
Husky Oil	Prince George	Colombie-Britannique	2
Imperial Oil	Dartmouth	Nouvelle-Écosse	26
Imperial Oil	Edmonton	Alberta	13
Imperial Oil	Ioco	Colombie-Britannique	6,5
Imperial Oil	Sarnia	Ontario	40
Inco Metals	Thompson	Manitoba	30
Irving Refining	Saint-Jean	Nouveau-Brunswick	73
Mobil Oil Canada	Teepee Creek	Alberta	11
Mobil Oil Canada	Wimborne	Alberta	63,5
Pan Canadian Petroleum	Morley	Alberta	6,5
Pétro-Canada	Gold Creek	Alberta	15,5
Pétro-Canada	Wildcat Hills	Alberta	64,5
Petrogas Processing	Crossfield	Alberta	615
Saratoga Processing	Coleman	Alberta	142
Shell Canada	Burnaby	Colombie-Britannique	5,5
Shell Canada	Burnt Timber Cr.	Alberta	181,5
Shell Canada	Corunna	Ontario	12,5
Shell Canada	Innisfail	Alberta	59,5
Shell Canada	Jumping Pound	Alberta	186,5
Shell Canada	Oakville	Ontario	18
Shell Canada	Simonette River	Alberta	97,5
Shell Canada	South Rosevear	Alberta	62,5
Shell Canada	Waterton	Alberta	1120
Steelman Gas	Steelman	Saskatchewan	2,5
Sulconam	Montréal Est	Québec	110
Sulpetro	Minnehick-Buck Lake	Alberta	16,5
Suncor	Black Diamond	Alberta	4,5
Suncor	Fort McMurray	Alberta	100
Suncor	Rosevear	Alberta	30,5
Syncrude	Sarnia	Ontario	4,5
Texaco Canada	Mildred Lake	Alberta	181,5
Texaco Canada	Bonnie Glen	Alberta	4,5
Westcoast Trans	Nanticoke	Ontario	12,5
Westcoast Trans	Fort Nelson	Colombie-Britannique	400
	Pine River	Colombie-Britannique	385

Société	Ville	Province	Capacité nominale, en kilotonnes/an (1982)
Westcoast Trans	Taylor Flats	Colombie-Britannique	118,5
Western Decalta	Turner Valley	Alberta	9
TOTAL			11 458,2
Production nationale (1982)			6 673
Importations (1982)			2
TOTAL			6 675

3.5 Fabrication industrielle (Shreve, 1977; CMI, 1980)

3.5.1 Information générale. – Au Canada, le principal mode d'extraction du soufre consiste à récupérer le soufre contenu à l'état de sulfure d'hydrogène dans les gaz naturels acides (teneur élevée) et à l'état libre ou combiné dans les pétroles (faible teneur). On obtient également le soufre (*a*) par désulfuration des gaz d'origine industrielle (gaz de cokeries, de raffineries, etc.), (*b*) à la suite du grillage des pyrites utilisé dans la préparation du dioxyde de soufre SO_2, et (*c*) par l'exploitation minière de gisements de soufre à l'état natif (faible pourcentage de la production).

3.5.2 Récupération du soufre. – On récupère le soufre contenu à l'état de sulfure d'hydrogène dans les gaz naturels par absorption dans une solution de mono-éthanolamine, de diéthanolamine, de carbonate de potassium chaud ou de Sulfinol [mélange d'eau, d'une amine secondaire (habituellement la diisopropylamine), de Sulfolane® (dioxyde de tétrahydrothiofène)] où il y a combinaison chimique au sulfure d'hydrogène et au dioxyde de carbone. Ces gaz sont ensuite régénérés par chauffage dans une colonne de strippage, et le sulfure d'hydrogène est ensuite transformé en soufre par le procédé Claus.

3.5.3 Procédé d'élaboration. – Le procédé Claus consiste en une oxydation du sulfure d'hydrogène: on brûle le sulfure d'hydrogène en présence d'une quantité d'air suffisante pour oxyder un tiers du sulfure d'hydrogène en dioxyde de soufre; dans certains cas, on ajoute du dioxyde de soufre pour obtenir un rapport de deux parties de sulfure d'hydrogène pour une partie de dioxyde de soufre. On fait alors passer le mélange sur un catalyseur à base d'alumine dans un réacteur Claus ou un autre type de réacteur, et on obtient la réaction suivante :

$$H_2S + 3/2\ O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$$
$$2H_2S + SO_2 \rightarrow 3\ S\ (\text{à l'état de vapeur}) + 2H_2O$$

Le rapport entre le volume de dioxyde de soufre et celui du sulfure d'hydrogène entrant dans le mélange exige une grande précision pour un bon rendement de l'élaboration du soufre. (Un ordinateur relié à un spectrophotomètre et aux systèmes de réglage de l'alimentation permet d'obtenir la précision nécessaire.) En faisant passer le mélange dans un autre réacteur où la

température est plus basse, on peut obtenir un rendement encore plus élevé. L'emploi de plusieurs réacteurs en série à des températures progressivement plus faibles permet de réduire à un niveau acceptable la quantité de composés soufrés résiduels avant de rejeter les effluents gazeux dans l'atmosphère.

Le soufre sort des réacteurs à l'état gazeux et passe ensuite dans un condenseur-convertisseur où il est liquéfié. L'opération se poursuit jusqu'à ce qu'on ait obtenu 95 p. 100 ou plus du soufre contenu à l'origine dans les gaz naturels. Le soufre fondu peut être transporté à l'état liquide ou coulé en feuilles, boulettes et granules. Ces deux dernières formes sont obtenues par extinction du soufre fondu avec des jets d'eau et d'air pulvérisés. L'extinction par voie humide produit des granules de dimensions très variées, alors que l'extinction à l'air engendre des boulettes de tailles assez uniformes.

3.6 Principales utilisations au Canada (CMI, 1980)

La consommation de soufre, dont la moitié provenait de la désulfuration des gaz d'origine industrielle, a dépassé en 1979 et 1980 1,7 million de tonnes. Les trois quarts de ce tonnage ont été utilisés sous forme d'acide sulfurique. La fabrication d'acide sulfurique constitue d'ailleurs la principale utilisation du soufre au Canada. L'industrie des pâtes et papiers vient au second rang des gros consommateurs de soufre au pays. Les autres industries qui se servent de quantités importantes de soufre ou d'acide sulfurique sont celles du traitement du minerai d'uranium, de la récupération des métaux, du raffinage du pétrole, des matières plastiques, des produits en caoutchouc, des savons et l'industrie alimentaire.

3.7 Principaux acheteurs au Canada (Corpus, 1982; CBG, 1980)

Abitibi-Price, Iroquois Falls, Thorold, Thunder Bay, Ont.; Kenogami, Qc; Grand Falls, T.-N.
BC Forest Products, Crofton, Mackenzie, C.-B.
Boise Cascade, Kenora, Ont.
Border Chemical, Transcona, Man.
Bowater Mersey, Brooklyn, N.-É.
Bowater Newfoundland, Cornerbrook, T.-N.
Canada Colours, Toronto, Ont.
Canadian Cellulose, Castlegar, C.-B.
Canadian Forest Products, Port Mellon, C.-B.
Canadian International Paper, Hawkesbury, Ont.; Trois-Rivières, Matane, Qc
Canadian Occidental Petroleum, Vancouver, C.-B.
Cariboo Pulp, Quesnel, C.-B.
Chemsolve, Willowdale, Ont.
Consolidated-Bathurst, Shawinigan, Grand Mère, Port Alfred, Qc
Cornwall Chemicals, Cornwall, Ont.
Crestbrook Timber, Skookumchuck, C.-B.
Domtar, Dolbeau, Donnacona, Qc
Donohue, Clermont, Qc
Esso Chemical Canada, Redwater, Alb.
Fraser, Edmundston, Atholville, N.-B.
Gaspesia Pulp & Paper, Chandler, Qc
Great Lakes Forest, Thunder Bay, Ont.
Gulf Minerals, Rabbit Lake, Sask.
IMC, Port Maitland, Ont.
Inland Chemicals, Ft. Saskatchewan, Alb.
Kruger Pulp & Paper, Trois-Rivières, Qc
Lake Utopia Paper, St. George, N.-B.
MacLaren James, Buckingham, Qc
MacMillan Bloedel, Harmac, Powell River, C.-B.
NL Chem Canada, Varennes, Qc
Northwood Pulp, Prince George, C.-B.
Nova Scotia Forest, Pt. Hawkesbury, N.-É.
Ontario Paper, Thorold, Ont.
QNS Paper, Baie-Comeau, Qc
Rayonier, Port Alice, C.-B.
Reed, Québec, Qc
St. Lawrence Chemical, Montréal, Qc
St. Raymond Paper, Desbiens, Qc
St. Regis Alberta, Hinton, Alb.
Sherritt Gordon Mines, Ft. Saskatchewan, Alb.
Spruce Falls Power, Kapuskasing, Ont.
Sulco Chemicals, Elmira, Ont.
Tahsis, Gold River, C.-B.
Tembec Forest Products, Témiscaming, Qc
Thio-Pet Chemicals, Ft. Saskatchewan, Alb.
Van Waters & Rogers, Richmond, C.-B.
Western Cooperative Fertilizer, Calgary, Alb.
Western Forest Products, Port Alice, C.-B.

4 MANUTENTION DU PRODUIT ET COMPATIBILITÉ

4.1 Conteneurs et autres récipients de transport

4.1.1 Transport en vrac. – La majeure partie du soufre est transportée à l'état solide dans des wagons-tombereaux. Le soufre à l'état liquide (fondu) est expédié dans des wagons-citernes et des véhicules-citernes routiers spécialement conçus à cette fin.

4.1.1.1 Wagons. – Le soufre à l'état solide est transporté habituellement dans des wagons ouverts de type tombereau, dont une illustration est présentée à la figure 4. Le tableau 2 donne les spécifications du wagon-tombereau illustré. La plupart des wagons-tombereaux ont une capacité de 125 m^3 (4400 pi^3) ou 91 tonnes métriques (100 tonnes) (ORER, 1982).

La Commission canadienne des transports et le Department of Transportation des États-Unis n'ont pas réglementé le transport du soufre à l'état liquide par wagon-citerne. On emploie d'ordinaire les wagons-citernes de type CCT/DOT 111A. Le plus communément utilisé est le wagon-citerne 111A100W1 de 50 500 l (11 000 gal) illustré à la figure 5, dont les spécifications sont données au tableau 3. Le déchargement du wagon-citerne peut s'effectuer au moyen d'une pompe, sous l'action de la gravité ou au moyen d'air comprimé, par un orifice de 102 mm (4 po) de diamètre situé sous le wagon et muni d'un robinet à tournant sphérique en acier inoxydable (Shell, 1982). Le robinet de déchargement par le bas est muni d'une enveloppe chauffante (Shell, 1982). On peut également décharger le wagon-citerne par le haut, au moyen d'air comprimé. Dans ce cas, le soufre fondu est retiré par un tube plongeur de remplissage et de déchargement, qui s'étend de la paroi inférieure à la plate-forme supérieure du wagon-citerne, où il se termine par une bride pleine de 51 mm (2 po). On fait passer l'air comprimé à une pression de 138 kPa (20 psi) par un raccord d'admission d'air de 25 mm (1 po) (MCA, 1959). Le wagon-citerne doit être muni de serpentins de chauffage extérieurs et isolé avec de la laine de verre. Les serpentins sont faits de tuyaux en acier, de type A53 et qualité B, de 203 mm (8 po) de diamètre, de forme semi-ovale, reliés les uns aux autres au tiers inférieur de la citerne (TCM, 1979).

Figure 4

SOUFRE

WAGON-TOMBEREAU TYPIQUE

(Référence: CLC, 1974; ORER, 1982)

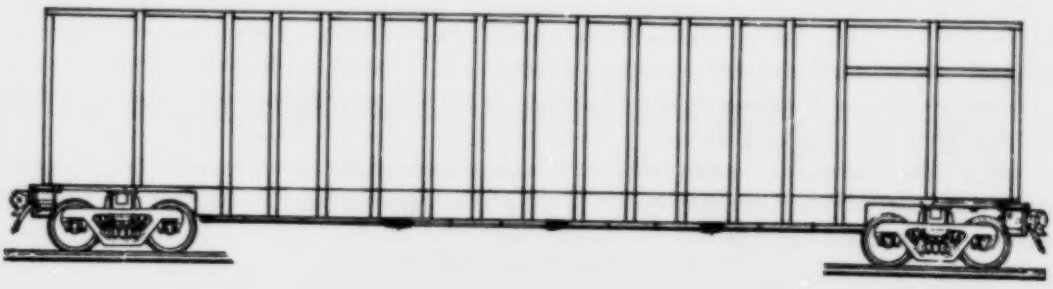


Tableau 2
Spécifications des wagons-tombereaux

Description		Mesures
Structure	Capacité de charge:	
	charge nominale	91 tonnes métriques (100 tonnes)
	volume utile	125 m^3 (4400 pi^3)
	Masse brute maximale	94 800 kg (209 000 lb)
Tombereau	Longueur extérieure	17,9 m (58 pi 7 po)
	Largeur extérieure	3,86 m (10 pi 8 po)
	Hauteur extérieure	3,76 m (12 pi 4 po)
	Longueur intérieure	14,6 m (48 pi)
	Largeur intérieure	2,97 m (9 pi 9 po)
	Hauteur intérieure	3,43 m (11 pi 3 po)
Dimensions approximatives	Longueur avec organes d'attelage	19 m (63 pi)
	Longueur avec pylônes de choc	18 m (60 pi)
	Distance entre les pivots de bogie	15 m (48 pi)
	Hauteur de chargement	5 m (15 pi)
	Largeur hors-tout	3 m (11 pi)

Le wagon-citerne doit également être doté, sur le dessus, d'une soupape régulatrice de pression réglée à 517 kPa (75 psi). Un indicateur de niveau, à tige ou à ruban, est optionnel. La pression maximale permise pour les wagons-citernes 111A100W1 est de 448 kPa (65 psi). Il faudrait souligner ici que le soufre à l'état liquide (fondu) n'est jamais transporté sous pression.

4.1.1.2 Véhicules routiers. – Le transport routier du soufre s'effectue soit par camion à benne, lorsqu'il est à l'état solide, soit par camion-citerne, lorsqu'il est à l'état liquide.

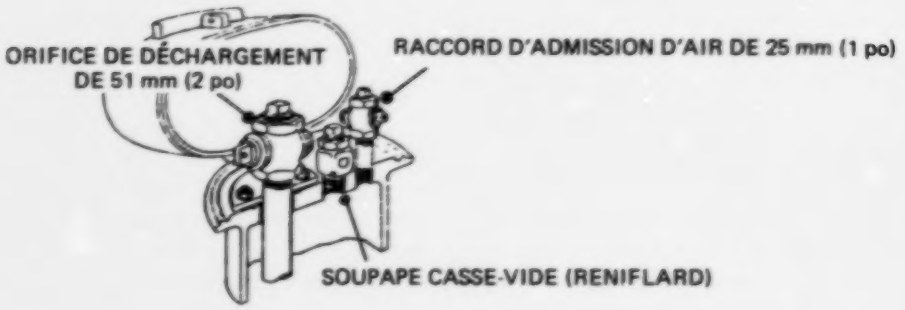
Comme les wagons-citernes, les camions-citernes peuvent être déchargés par le bas, par un orifice muni d'un robinet à tournant interne (CMI, 1980). Lorsqu'on les décharge par le haut, à l'aide d'air comprimé, on se sert d'une colonne montante que l'on introduit par le toit de la citerne (MCA, 1959). On ne transporte le soufre à l'état liquide (fondu) que sur de courtes distances, et les camions-citernes utilisés à cette fin ne sont pas habituellement munis de dispositifs d'injection de vapeur. Il faut toutefois que les camions-citernes soient isolés pour éviter qu'il y ait trop de pertes de chaleur.

Le soufre fondu n'est jamais transporté sous pression. Les camions-citernes doivent faire l'objet d'un essai avec une pression minimale de 207 kPa (30 psi) afin de s'assurer qu'ils peuvent tolérer la pression de 138 kPa (20 psi) de l'air comprimé employé pour le déchargement par le haut (MCA, 1959).

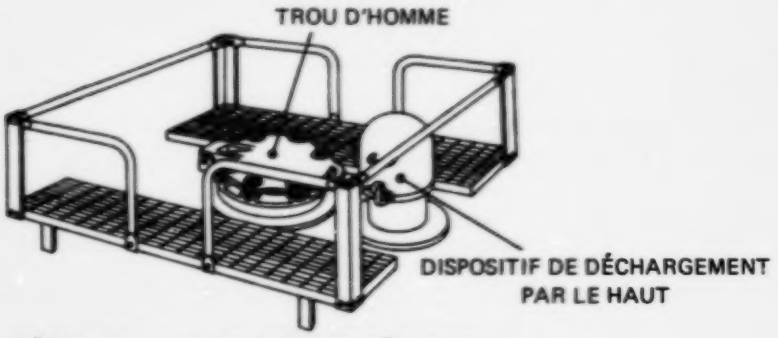
Figure 5

SOUFRE **WAGON-CITERNE – CLASSE 111A100W1**

(Référence: TCM, 1979; RTDCR, 1979)



DÉTAIL DU DISPOSITIF DE DÉCHARGEMENT PAR LE HAUT



DÉTAIL DE LA PLATE-FORME SUPÉRIEURE

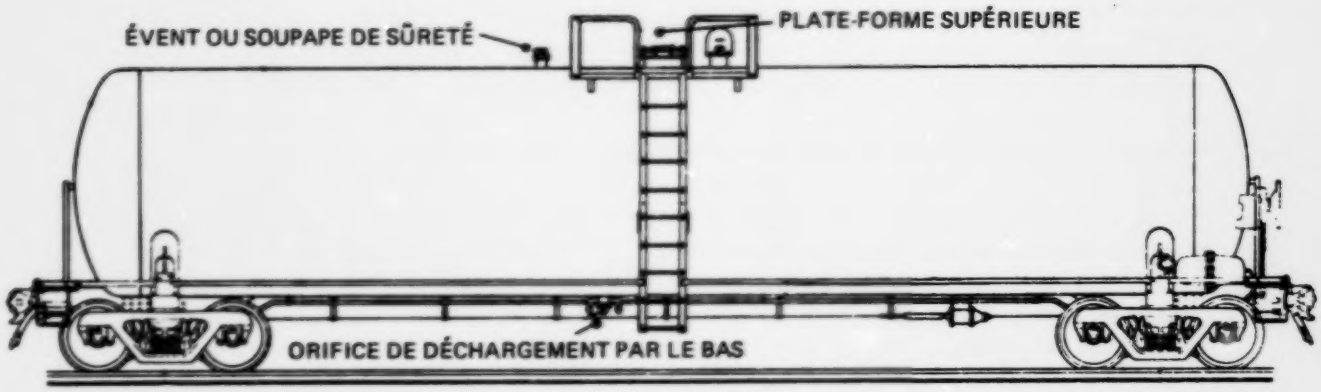


ILLUSTRATION DU WAGON-CITERNE

Tableau 3
Spécifications des wagons-citernes de classe 111A100W1
(TCM, 1979; Shell, 1982)

Description		Dimensions
Structure	Capacité nominale	50 500 l (11 000 gal)
	Tare	28 600 kg (63 000 lb)
	Masse brute maximale	119 000 kg (263 000 lb)
Réservoir	Matériau	Acier
	Épaisseur	11,1 mm (7/16 po)
	Diamètre intérieur	2,38 m (94 po)
	Pression d'essai	689 kPa (100 psi)
	Pression d'éclatement	3450 kPa (500 psi)
Dimensions	Longueur avec organes d'attelage	14 m (45 pi)
	Longueur avec pylônes de choc	13 m (43 pi)
	Distance entre les pivots de bogie	9 m (28 pi)
	Hauteur au sommet du caillebotis	4 m (12 pi)
	Hauteur hors-tout	4 m (14 pi)
	Largeur hors-tout (avec poignées)	3,2 m (127 po)
	Longueur du caillebotis	2,4 m (8 pi)
	Largeur du caillebotis	1,8 m (6 pi)
Dispositifs de chargement et de déchargement		
• Par le haut	Raccord du tube plongeur de déchargement	51 mm (2 po)
	Trou d'homme/orifice de remplissage	457 mm (18 po)
	Raccord d'admission d'air	25 mm (1 po)
• Par le bas	Orifice de déchargement	102 mm (4 po)
	Raccord de déchargement muni d'une enveloppe chauffante	51 mm (2 po)
Dispositifs de sécurité	Soupape de sûreté réglée à 517 kPa (75 psi)	
Dôme	Aucun	
Isolation	Laine de verre de 152 mm (6 po)	

4.2 Déchargement

Le déchargement du soufre à l'état solide, transporté par wagon-tombereau ou par camion à benne, se fait en vrac et n'exige pas de méthode spéciale à suivre.

4.2.1 Matériel et procédés de déchargement des wagons-citernes. – Avant de procéder au déchargement du soufre à l'état liquide, il faut prendre les précautions suivantes (MCA, 1959; Shell, 1982; CCPA, 1982):

- vérifier que le réservoir d'emmagasinage dans lequel est transvasé le soufre a la capacité suffisante pour recevoir tout le contenu du wagon-citerne;
- si le déchargement se fait la nuit, les dispositifs d'éclairage doivent être de type antidéflagrant;
- le personnel ne doit en aucun cas pénétrer dans le wagon;
- les freins doivent être serrés, et les roues, calées; il faut installer un appareil ou une aiguille de déraillement, mettre le wagon à la terre et placer des écriteaux avertisseurs;
- parce qu'il peut se dégager du sulfure d'hydrogène, on doit disposer d'équipement respiratoire de secours et pouvoir s'assurer rapidement de la présence d'un médecin;
- il doit y avoir un quai de service offrant toutes les conditions de sécurité au poste de déchargement.

Le déchargement du wagon-citerne peut s'effectuer par le haut ou par le bas (voir la figure 6).

Pour décharger un wagon-citerne par le haut de son contenu de soufre fondu, il faut suivre les étapes suivantes (MCA, 1959):

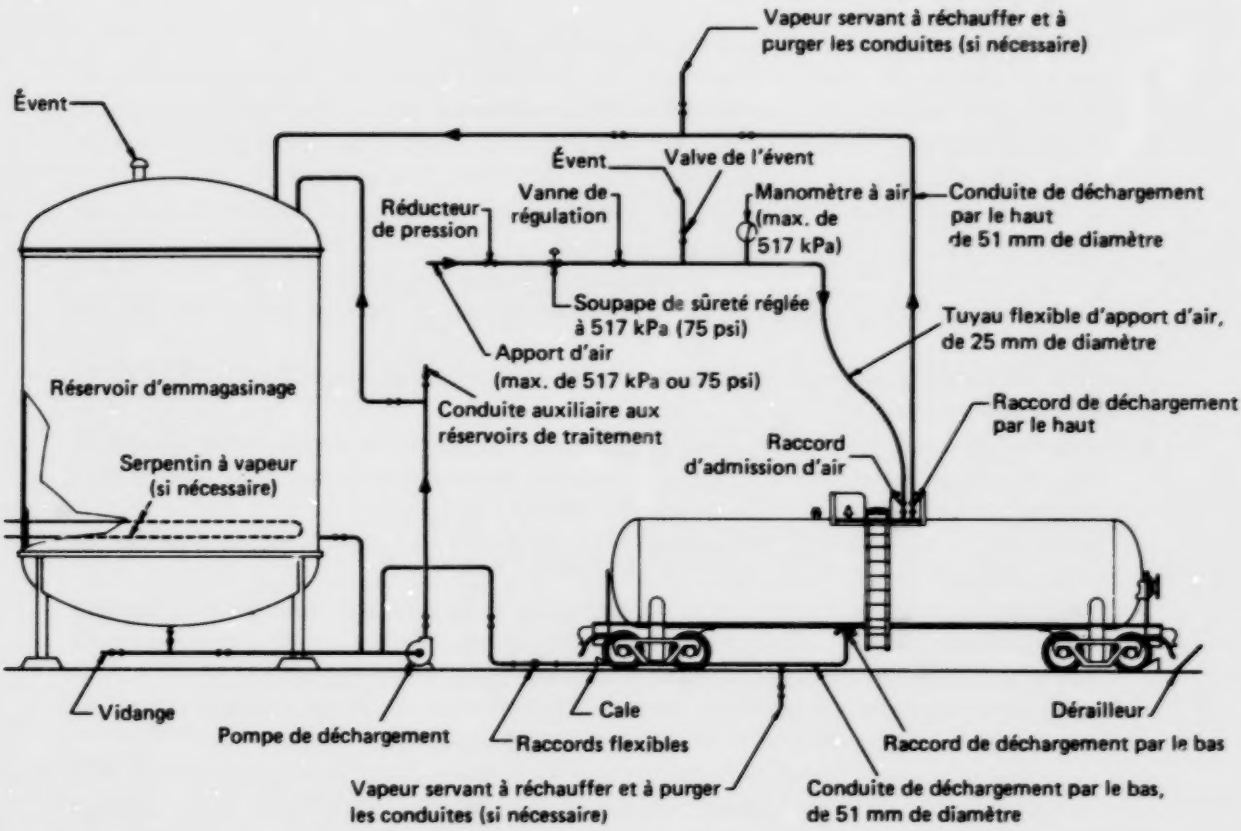
- s'assurer que toute surpression causée par la vapeur à l'intérieur du wagon-citerne est libérée, que la pression est réglée à la pression atmosphérique et que le soufre est entièrement fondu;
- raccorder la conduite de déchargement chauffée de 51 mm (2 po) à l'orifice de déchargement;
- raccorder la conduite d'apport d'air comprimé de 25 mm (1 po); augmenter la pression d'air à environ 448 kPa à 517 kPa (65 psi à 75 psi) pour l'opération de déchargement; la conduite d'air comprimé doit être munie d'une soupape de sûreté réglée à 517 kPa;
- après avoir ouvert le robinet de la conduite d'apport d'air comprimé, ouvrir le robinet de la conduite de déchargement afin de décharger le wagon-citerne;
- une fois le wagon-citerne déchargé, fermer le robinet de la conduite d'apport d'air comprimé, et ouvrir sa soupape de sûreté pour réduire sa pression à la pression atmosphérique;
- pour fermer le wagon-citerne, suivre les étapes qui précèdent, mais dans l'ordre inverse.

Pour décharger un wagon-citerne par le bas de son contenu de soufre fondu, que ce soit par gravité, au moyen d'air comprimé ou à l'aide d'une pompe, il faut suivre les étapes suivantes (MCA, 1959; Shell, 1982):

- s'assurer que toute surpression causée par la vapeur à l'intérieur du wagon-citerne est libérée, que la pression est réglée à la pression atmosphérique et que le soufre est entièrement fondu;

Figure 6

SOUFRE **DÉCHARGEMENT D'UN WAGON-CITERNE**



Remarque: se référer au texte pour connaître la méthode de déchargement par le haut ou par le bas.

- par temps froid, réchauffer la soupape de déchargement par le bas avec de la vapeur; raccorder les serpentins à vapeur à la conduite de vapeur vive; on doit ajuster l'apport de vapeur pour obtenir une pression de 483 kPa (70 psi) et chauffer le soufre à 132 °C (pendant douze à vingt heures); réduire la pression de vapeur à 276 kPa (40 psi) avant d'effectuer l'opération de déchargement;
- après avoir raccordé la conduite de déchargement à l'orifice de déchargement par le bas de 51 mm (2 po), ouvrir l'obturateur intérieur de déchargement par le bas commandé par le haut en tournant le volant (levier) de commande situé sur le toit du wagon-citerne;
- décharger le wagon-citerne sous l'action de la gravité, au moyen d'air comprimé ou à l'aide d'une pompe; il faudra prendre les mêmes précautions pour ajuster à la pression atmosphérique la pression à l'intérieur du wagon-citerne que dans le cas du déchargement par le haut;
- pour fermer le wagon-citerne, suivre les étapes qui précèdent, mais dans l'ordre inverse.

4.2.2 Matériel et procédés de déchargement des véhicules-citernes routiers. – Le déchargement des camions-citernes de leur contenu de soufre fondu s'effectue de façon similaire à celui des wagons-citernes, sauf qu'on n'utilise habituellement pas de générateur de vapeur. La méthode de déchargement des wagons-citernes s'applique tout aussi bien au déchargement des camions-citernes.

4.2.3 Matériaux de fabrication et spécifications des organes de déchargement. – Les matériaux de fabrication des divers composants des organes de déchargement ainsi que leurs spécifications sont ceux qui sont généralement utilisés pour le transport du soufre fondu. D'autres types de matériaux peuvent être employés pour le service du soufre à l'état solide et celui du soufre à l'état liquide dans certains cas. Le tableau 4 donne la liste des matériaux qui servent habituellement à la fabrication des organes de déchargement.

Les organes de l'équipement type de déchargement comprennent notamment les conduites et raccords, les raccords flexibles, les vannes et soupapes, les garnitures, les pompes et les réservoirs d'emmagasinage. La section Autres du tableau 4 comprend les composants dont la fonction n'est pas précise ou qui n'est pas donnée dans les références.

L'acier est le matériau le plus couramment employé dans la fabrication des conduites, des soupapes et des pompes destinées au service du soufre à l'état liquide (fondu). Le chlorure de polyvinyle convient également pour les conduites et les raccords. Les conduites nécessitant une plus grande flexibilité sont garnies de joints articulés. Les joints à bride nécessitent qu'on les soude. Une diminution de la contrainte au point de soudure permettra une plus longue durée de service. Les conduites doivent faire l'objet d'essais appropriés pour vérifier leur étanchéité. Toute fuite devra être soigneusement colmatée. Si l'eau est employée pour ces essais, les conduites devront être complètement asséchées avant de servir au transport du soufre fondu (CE, 1978; MWPP, 1978).

Les conduites de déchargement par le haut ou par le bas ont habituellement 51 mm (2 po) de diamètre, mais les conduites auxiliaires peuvent avoir des diamètres différents. Toutefois, il est déconseillé d'employer des conduites d'un diamètre inférieur à 25 mm (1 po). La plupart des conduites et des organes de déchargement du soufre fondu sont chauffés à la vapeur et calorifugés. L'enveloppe de vapeur est le procédé le plus efficace de contrôle de la température du soufre fondu. Étant donné que le soufre fondu est un mauvais conducteur de la chaleur, il est très difficile de le réchauffer dans les conduites, une fois refroidi à moins de 115 °C. Par conséquent,

il est indispensable que les conduites extérieures puissent s'auto-drainer. Si on laisse se refroidir les conduites sans qu'elles soient complètement drainées, le soufre résiduel les oxydera et les corrodera.

Les robinets à tournant ou les clapets à bille en acier inoxydable 316 conviendront le mieux comme obturateurs intérieurs. Les joints devraient être fabriqués en résine de fluorure de polyvinylidène ou de polyéther chloré. Différents types de pompes sont utilisées pour décharger le soufre fondu; on recommande l'emploi des pompes centrifuges; les pompes à engrenage et à piston peuvent également convenir. Les pompes centrifuges doivent être du type à admission unilatérale à entraînement magnétique, dépourvu de joints étanches, avec une extrémité d'admission en acier inoxydable 316. Toutes les pompes doivent être munies d'une chemise de vapeur ou de conduites de chauffage à la vapeur. Elles doivent être équipées de moteurs puissants à cause de la densité relative élevée du soufre fondu. Il faut utiliser une pompe submergée lorsque le soufre est emmagasiné dans un bassin (CE, 1978). On utilise habituellement des réservoirs d'emmagasinage en acier inoxydable soudé. Un revêtement à l'épreuve du soufre peut également convenir. Le réservoir d'emmagasinage devrait être calorifugé de façon appropriée et équipé de serpentins de chauffage pour conserver le soufre à l'état liquide (fondu). Les conduites et les réservoirs d'emmagasinage devraient être mis à la terre (CE, 1978).

4.3 Compatibilité du soufre et des matériaux de fabrication

La compatibilité du soufre et des matériaux qui entrent dans la fabrication de l'équipement de service est indiquée au tableau 4. Le système d'évaluation utilisé dans le tableau 4 est décrit brièvement ci-après.

Recommandé: Le matériau aura une performance satisfaisante avec l'application indiquée.

Avec réserves: Le matériau montrera des signes de détérioration avec l'application indiquée; il peut convenir pour un usage intermittent ou pour un service de courte durée.

Déconseillé: L'application indiquée causera une grave détérioration du matériau; son usage est donc déconseillé.

Tableau 4
Compatibilité du soufre et de certains matériaux de fabrication

Application	État du soufre		Matériau recommandé	Réserves	Matériau déconseillé
	Teneur	Température			
1. Conduites et raccords	a	23 °C jusqu'à la limite de tolérance du matériau[b]	Polyéthylène (DPPED, 1967; MWPP, 1978)		
	a	60 °C jusqu'à la limite de tolérance du matériau[b]	PVC I (DPPED, 1967, MWPP, 1978)	PVC II (DPPED, 1967)	
	100 %	> 120 °C, soufre fondu, sans humidité	Acier[c] (CE, 1978)		
	a	121 °C, fondu[d]	Fluorure de polyvinylidène (DCRG, 1972)		
	a	121 °C, fondu[d]	Polyéther chloré (DCRG, 1972)		
	a	Jusqu'à la limite de tolérance du matériau[e]	Acrylonitrile-butadiène-styrène (MWPP, 1978)		
	100 %	> 120 °C, fondu, sans humidité	Acier doux, fonte (Kirk-Othmer, 1983)		
2. Soupapes[f]	100 %	> 120 °C, fondu, sans humidité	Acier[c] (CE, 1978)		
	a	< 130 °C, fondu sans humidité	Acier inoxydable 316 (JSSV, 1979)		
	a	130 °C à 444 °C, fondu, sans humidité			Acier inoxydable 316 (JSSV, 1979)
	a	Présence d'humidité[a]		Acier inoxydable 316 (JSSV, 1979)	

[a] Absence de données.
[b] D'après une autre source de référence, le matériau a une moins bonne tolérance à des températures plus élevées.
[c] Type d'acier non spécifié.
[d] On suppose le soufre fondu, mais on ignore sa teneur en humidité.
[e] Ce matériau est supposé avoir une excellente tolérance au soufre à l'état solide ou à l'état liquide.

Tableau 4 (suite)

Application	État du soufre		Matériau recommandé	Réserves	Matériau déconseillé
	Teneur	Température			
3. Joints	a	a, g	Fluorure de polyvinylidène (DCRG, 1972)		
	a	a, g	Polyéther chloré (DCRG, 1972)		
4. Pompes	100 %	> 120 °C, fondu sans humidité	Acier[c] (CE, 1978)		
	a	Fondu[a]	Tout en fer (HIS, 1969)		
	a	a	Aciers inoxydables 304 et 316 (HIS, 1969)		
5. Emmagasinage	100 %	129 °C à 140 °C, fondu, sans humidité	Acier (soudé)[c,h] (CE, 1978)		
	100 %	130 °C, fondu	Acier inoxydable 316[i] (CE, 1978)		
	100 %	129 °C à 140 °C, fondu, sans humidité	Acier avec revêtement intérieur de béton[j] (CE, 1978)		
6. Autres	a	20 °C, sans humidité	Aciers inoxydables 302, 304, 316 et 430 (ASS)	Acier inoxydable 410 (ASS)	
	a	20 °C, présence d'humidité	Acier inoxydable 316 (ASS)	Aciers inoxydables 302, 304 et 430 (ASS)	Acier inoxydable 410 (ASS)
	a	20 °C[l]	Polyéthylène Polypropylène Polyoxyméthylène Caoutchouc naturel	Chlorure de polyvinyle non plastifié	

			Caoutchouc d'acrylonitrile/ butadiène Caoutchouc d'isobutylène/ isoprène Caoutchouc d'éthylène-propylène Polychloroprène (Néoprène) Caoutchouc fluoré (Viton) Polyéthylène chlorosulfonique (Hypalon)		
	a	60 °C[l]	Polypropylène Polyoxyméthylène Caoutchouc naturel Caoutchouc d'acrylonitrile/ butadiène Caoutchouc d'isobutylène/ isoprène Caoutchouc d'éthylène-propylène Polychloroprène (Néoprène) Caoutchouc fluoré (Viton) Polyéthylène chlorosulfonique (Hypalon)	Chlorure de polyvinyle non plastifié Polyéthylène (GFPS)	
	a	60 °C, en coulis	Chlorure de polyvinyle (TPS, 1978)		
		85 °C, en coulis	Chlorure de polyvinyle chloré (TPS, 1978)		
	a	< 120 °C, à l'état solide, en présence d'humidité	Alliages d'acier et d'aluminium, acier inoxydable (Kirk-Othmer, 1982)		

[f] En se basant sur les données fournies sur les conduites, les soupapes, les pompes et les réservoirs, on peut supposer que l'acier (surtout l'acier inoxydable 316) convient le mieux pour le soufre fondu, en l'absence d'humidité, à une température d'environ 140 °C.

[g] D'après les données sur les conduites et les raccords, peut être employé pour le soufre fondu à 121 °C.

Tableau 4 (suite)

Application	État de soufre		Matériau recommandé	Réserves	Matériau déconseillé
	Teneur	Température			
		> 120 °C, fondu			Caoutchouc naturel Styrène/ butadiène (GR-5, Buna S) Polychloroprène (Néoprène) Caoutchouc d'acrylonitrile/ butadiène (Nitrile, Buna N) Caoutchouc d'isobutylène/ isoprène (Butyle) Polyéthylène chlorosulfonique (Hypalon) Caoutchouc d'éthylène-propylène (GPP)
	a	a	Polyéthylène chlorosulfonique (Hypalon) (GPP)	Caoutchouc d'éthylène-propylène (GPP)	Caoutchouc naturel Styrène/ butadiène (GR-5, Buna S)

				Caoutchouc d'acrylonitrile/ butadiène (Nitrile, Buna N) (GPP) Caoutchouc d'isobutylène/ isoprène (Butyle) (GPP) Cuivre, alliages de cuivre (PB216658)
100 %	> 120 °C, fondu, sans humidité			
100 %	24 °C à 149 °C	Verre (CDS, 1967)		Verre (CDS, 1967)
100 %	204 °C à 240 °C, fondu[l]	Titane (FMT, AMC)		
a	> 120 °C, fondu, sans humidité	Aciers inoxydables 304, 304L, 321, 347, 316, 316L Nickel, Monel, Inconel (SFC, GAC)		
a	Présence d'humidité	Aciers inoxydables 316, 316L Inconel (SFC, GAC)	Aciers inoxydables 304, 304L, 321, 347 Nickel, Monel (SFC, GAC)	
a	Température élevée			Nickel et alliages de nickel (CE, 1980)

[h] Pour de grandes quantités.
[i] Aucune référence.
[j] Pour de petites quantités.
[k] Plusieurs autres matériaux qui peuvent servir à la fabrication d'équipement de service du soufre sont cités dans la section Autres du présent tableau. Aucune application spécifique n'a été fournie dans les références pour ces matériaux. Il est donc conseillé d'effectuer des essais avant de les employer.
[l] La teneur en humidité n'a pas été spécifiée.
[m] Aucune référence au liquide du coulis.

5 FUITE ET MIGRATION DU SOUFRE

5.1 Aperçu général

Le soufre est transporté à l'état solide en feuilles, en granules et en boulettes. Lorsqu'on le transporte à l'état liquide il faut le conserver à des températures élevées. Déversé dans l'eau, le soufre à l'état liquide s'épaissit, se solidifie et coule au fond. Il peut arriver que le soufre fondu se transforme en polymère amorphe lors d'un déversement en eaux très froides. Le déversement de soufre fondu dans l'eau produira une grande quantité de vapeurs. Déversé sur le sol, le soufre fondu se solidifiera à la surface. Le soufre à l'état liquide ne peut s'infiltrer dans le sol jusqu'à la nappe phréatique et ne pose à cet égard aucun problème pour l'environnement. Le dégagement d'une grande quantité de vapeurs de soufre dans l'atmosphère n'est pas considéré dangereux à cause de sa faible tension de vapeur. Toutefois, la dispersion de particules de soufre à la suite d'un accident peut avoir des répercussions à l'échelle locale: une mince couche de soufre sur la surface métallique de pièces d'équipement, de structures, etc. peut les corroder à cause de la formation d'acides.

Migration du polluant : Fuite ou déversement { Débit de fuite / Pourcentage restant

5.2 Fuite du soufre

5.2.1 Introduction. – Le soufre est habituellement transporté par wagon-citerne, à la pression atmosphérique, à une température dépassant 122 °C. Parce qu'il existe une grande variété de modèles de wagons-citernes, il a fallu en choisir un en particulier pour établir les nomogrammes de fuite. Le modèle choisi a 2,75 m de diamètre, 13,4 m de longueur et peut contenir 80 000 l. Il faudrait souligner ici que le même modèle a été adopté dans tous les Enviroguides pour des raisons d'uniformité. Il est connu que le wagon-citerne type employé pour le transport du soufre à l'état liquide ne peut contenir que 50 000 l.

Si la paroi inférieure d'un wagon-citerne transportant du soufre fondu est perforée, son contenu s'écoulera sous l'action de la pesanteur. Il faut toutefois noter que les wagons-citernes transportant du soufre fondu ne sont jamais chauffés durant le voyage et qu'il se forme habituellement une croûte de soufre à l'état solide qui recouvre les parois intérieures et dont l'épaisseur varie selon la durée du voyage et la température extérieure. Le débit de fuite dépendra de la grosseur de la perforation et de la température extérieure. Il pourrait fort bien arriver que le soufre fondu obture l'ouverture en se solidifiant et qu'il arrête complètement l'écoulement (SUDIC, 1982). Les nomogrammes qui suivent ont été préparés en prévision du pire, comme le cas où tout le soufre s'écoulerait. Grâce aux nomogrammes, on pourra calculer la quantité de liquide restant dans la citerne ainsi que le débit de fuite du liquide. Comme les citernes ne sont pas sous pression et que le soufre à l'état liquide est peu volatil, aucun nomogramme n'a été élaboré sur la fuite éventuelle de vapeurs par un orifice situé sur le dessus de la citerne.

Dans le cas d'un orifice situé dans le bas d'une citerne, le débit de sortie, en l'occurrence le débit de fuite, se calcule par la méthode dite des orifices (Streeter, 1971). Le débit de fuite (q) est fonction de la section (s) et de la forme de l'orifice, de la hauteur (h) du liquide au-dessus de l'orifice et du coefficient de débit (Cq). Aux fins de l'élaboration des nomogrammes, on a établi le coefficient de débit à 0,8.

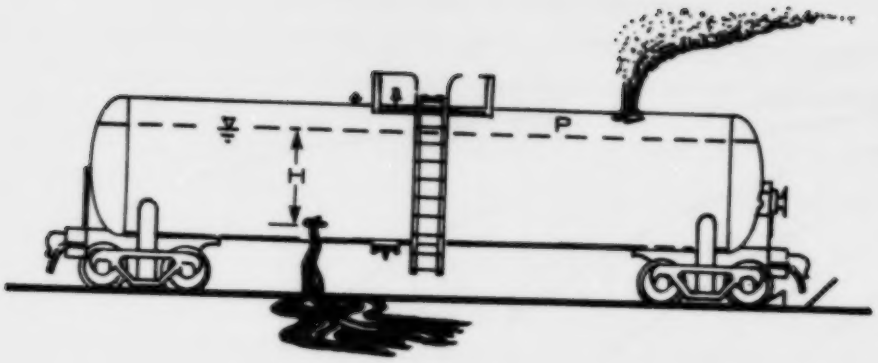


Figure 7 PERFORATION DE LA PAROI INFÉRIEURE D'UN WAGON-CITERNE

5.2.2 Nomogrammes de fuites

5.2.2.1 Pourcentage de liquide restant en fonction du temps d'écoulement. – La figure 8 permet d'évaluer le pourcentage de liquide restant dans un wagon-citerne en fonction du temps écoulé depuis le moment du bris et en fonction d'un certain nombre de diamètres de l'orifice. Ces derniers sont des diamètres équivalents et valent pour des orifices de toutes formes.

On suppose que le wagon-citerne type a 2,75 m de diamètre et 13,4 m de longueur, qu'il contient 80 000 l de liquide et qu'il est plein au moment du bris. Le volume de liquide restant, après un temps d'écoulement donné (t), n'est pas seulement fonction du débit de fuite, mais aussi de la taille et de la forme du wagon-citerne.

5.2.2.2 Débit de fuite en fonction du temps d'écoulement. – La figure 9 permet d'évaluer à tout instant le débit de fuite après un temps d'écoulement donné (t), en fonction de diamètres équivalents donnés. Le nomogramme ne vaut que pour un wagon-citerne dont le contenu initial est de 80 000 l.

5.2.3 Exemples de calcul

PROBLÈME A

Il y a eu bris d'un wagon-citerne type (diamètre de 2,75 m et longueur de 13,4 m) rempli. L'orifice est situé dans le bas de la citerne. Son diamètre équivalent est de 150 mm. Quel pourcentage du volume initial de 80 000 l représente le volume de liquide restant après 10 minutes?
Solution (voir figure 8): si t = 10 mn et D = 150 mm, le volume de liquide restant représente 36 p. 100 (soit 28 800 l) du volume initial.

PROBLÈME B

Les données du problème B étant les mêmes que celles du problème A, quel est le débit instantané après 10 minutes d'écoulement? Solution (voir figure 9): si t = 10 mn et D = 150 mm, le débit instantané (q) = 70 l/s.

Figure 8

SOUFRE — POURCENTAGE DE LIQUIDE RESTANT EN FONCTION DU TEMPS D'ÉCOULEMENT

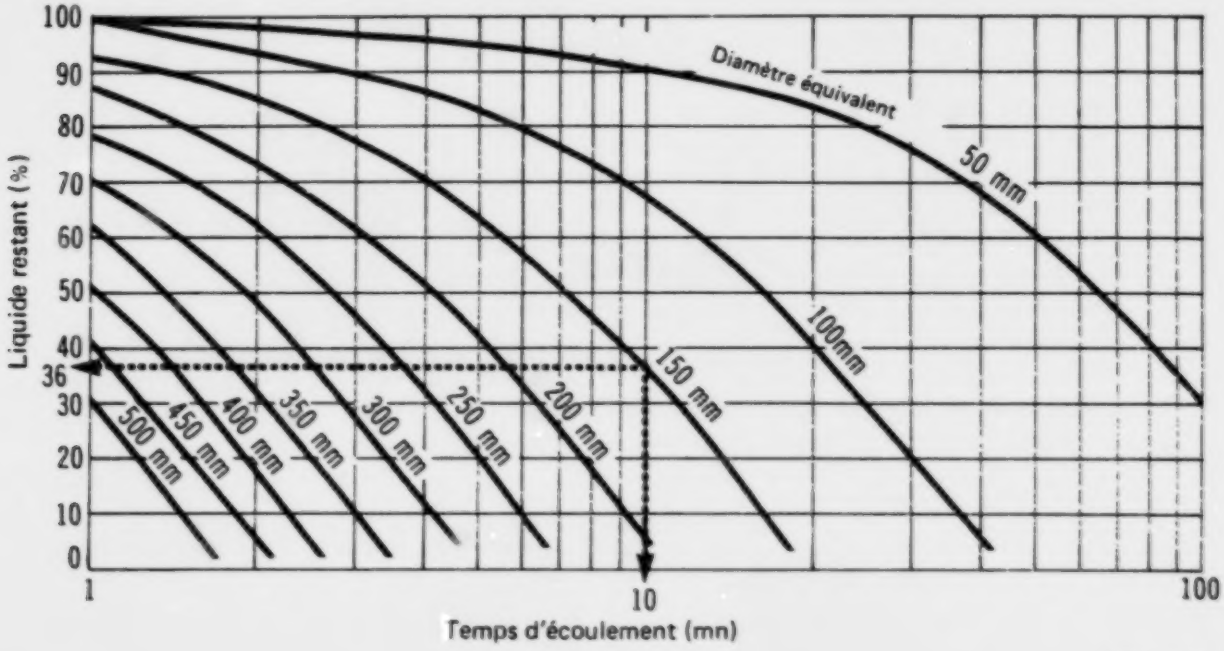
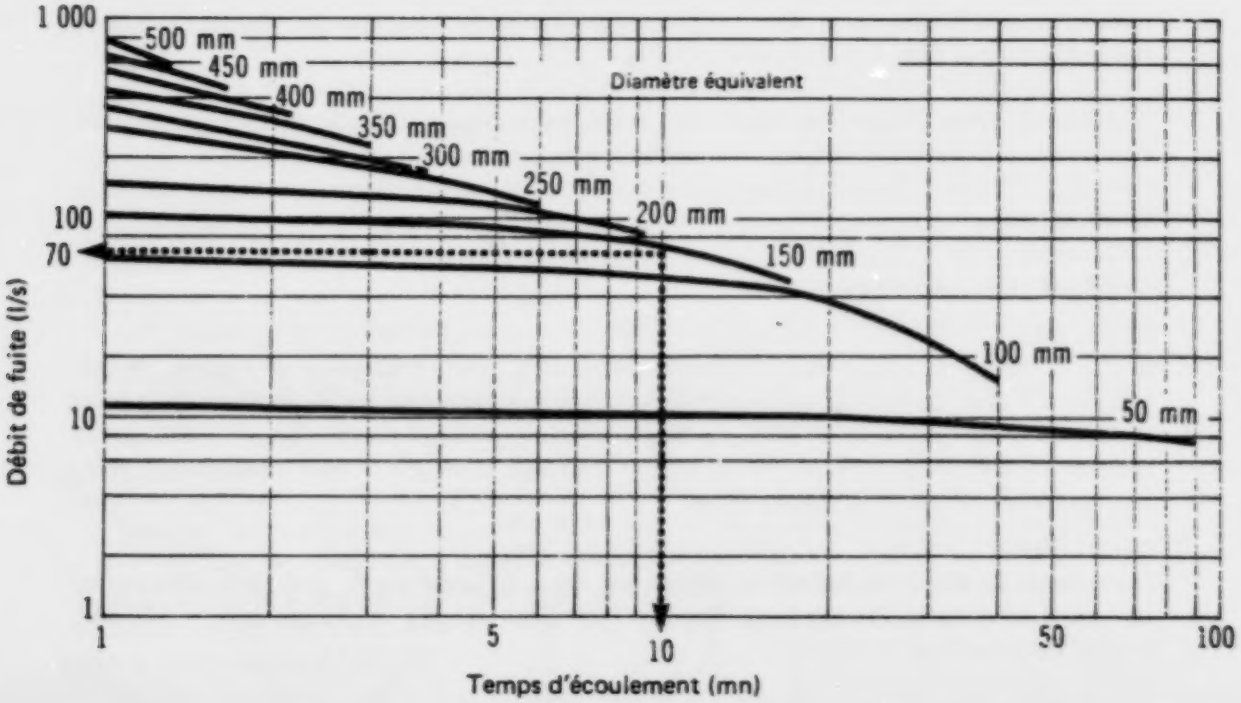


Figure 9

SOUFRE — DÉBIT DE FUITE EN FONCTION DU TEMPS D'ÉCOULEMENT



5.3 Diffusion atmosphérique

Comme le soufre à l'état solide est non volatil dans les circonstances prévisibles d'un déversement et que le soufre à l'état liquide se solidifie assez rapidement, une dispersion importante de particules de soufre dans l'atmosphère est peu probable. Toutefois, le soufre à l'état solide emmagasiné en tas ou des particules de soufre dégagées sur les lieux d'un déversement peuvent causer un empoussièrement local.

5.4 Comportement dans l'eau

Le soufre est transporté soit à l'état solide, soit à l'état liquide à une température élevée. Déversé dans l'eau, le soufre fondu s'épaissit dans la plupart des cas, se solidifie et coule au fond. Cette substance insoluble ne représente peut-être pas une source importante de pollution à court terme. Néanmoins, il faudrait étudier les effets du soufre sur l'environnement à long terme. Le comportement du soufre au contact de l'eau et du sol est étudié de façon plus détaillée aux sections 6.2.3, 6.5, 6.6, 9.1.3 et 9.1.4. Aucun nomogramme n'a été préparé pour décrire le comportement du soufre dans l'eau.

5.5 Comportement dans le sous-sol: pénétration dans le sol

Le déversement de soufre à l'état solide ou à l'état liquide ne représente pas une source importante de pollution des eaux souterraines à court terme. Une étude des répercussions à long terme a été faite aux sections 6.2.3, 6.5, 6.6, 9.1.3 et 9.1.4.

Déversé sur le sol, le soufre fondu se solidifie avant d'atteindre une profondeur importante. À l'état solide, le soufre est insoluble et ne peut se déplacer jusqu'à la nappe phréatique. La formation de produits acides à la suite d'une réaction avec l'eau peut toutefois créer des problèmes à long terme. Pour ces raisons, aucun nomogramme n'a été préparé pour décrire le déplacement du soufre dans le sol.

6 PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

6.1 Limites maximales admissibles

Les limites maximales admissibles constituent dans certains cas des éléments de règlements, alors que dans d'autres cas, elles correspondent seulement à des recommandations.

6.1.1 Qualité de l'eau (WQS, 1979). – La teneur en soufre de l'eau n'a pas encore été réglementée, bien qu'il existe des règlements sur les plus importants produits de son oxydation et de sa réduction: les sulfates et les sulfites. La teneur maximale admissible en sulfates a été fixée à 500 mg/l pour l'eau potable et à 1000 mg/l pour l'eau destinée au bétail. La teneur idéale en sulfates a été établie à 150 mg/l. La teneur maximale admissible en sulfites a été fixée à 0,05 mg/l pour l'eau potable. Les sulfites présents dans des eaux aérées, avec un pH normal, s'oxydent rapidement en sulfates.

6.1.2 Qualité de l'air. – La teneur en soufre de l'atmosphère n'est actuellement pas réglementée. Les normes établies pour les produits de la réaction ou de la combustion du soufre, comme le dioxyde de soufre et le sulfure d'hydrogène, ont fixé à 830 $\mu g/m^3$ la teneur en dioxyde de soufre et à 30 $\mu g/m^3$, le sulfure d'hydrogène (Ontario E.P.Act, 1971).

6.2 Toxicité pour les espèces aquatiques

6.2.1 Évaluation de la toxicité aux États-Unis. – La tolérance moyenne au soufre pour 96 heures (TLm 96) correspond à des teneurs supérieures à 1000 mg/l (RTECS, 1979).

6.2.2 Mesures de toxicité

Toxicité mesurée en eau douce

Teneur en soufre (ppm)	Durée de l'essai (h)	Espèce	Résultat	Caractéristiques de l'eau	Référence
A. Poissons					
16 000	5	Cyprin doré	Taux de mortalité de 100 p. 100	Soufre colloïdal dans eau trouble	NRCC, 1977*
10 à 80	Non spécifiée	Cyprin doré	Seuil théorique		NRCC, 1977
10 000	96	Gambusie	TLm	Eau trouble	NRCC, 1977
1600	3,5-5,25	Cyprin doré	Létal	Soufre colloïdal dans eau du robinet	NRCC, 1977

B. Invertébrés et microorganismes
Il n'existe aucune référence sur les effets physiologiques du soufre sur les invertébrés et les microorganismes aquatiques.

* Les essais ont été effectués en réalité entre 1922 et 1957.

6.2.3 Étude du milieu aquatique. – Déversé dans l'eau, le soufre fondu s'épaissit, se solidifie et coule au fond où il nuit à la vie aquatique en recouvrant le fond d'une couche épaisse mais localisée.

Le déversement de soufre à l'état solide entraîne la présence de soufre colloïdal en suspension, qui suscite le même genre de problèmes que ceux causés par d'autres matières en suspension et peut provoquer la mort d'organismes marins à la suite de blessures ou de l'obstruction des branchies ou des voies respiratoires. En se déposant au fond, le soufre peut constituer une pellicule qui empêche le développement de la couverture biologique naturelle et peut ravager les frayères. Lorsqu'il est en suspension, le soufre colloïdal nuit à la biocoenose aquatique en constituant un écran qui filtre la lumière et gêne la photosynthèse. Des teneurs en soufre colloïdal en suspension de 1600 mg/l à 10 000 mg/l pendant plusieurs heures sont toxiques pour les poissons (PB-216658).

Le déversement de soufre dans l'eau peut susciter en outre d'autres types de problèmes. Le soufre fondu peut contenir, par exemple, de grandes quantités de sulfure d'hydrogène qui pourrait être libéré dans l'eau. Le soufre colloïdal en suspension peut s'oxyder lentement et produire du dioxyde de soufre (SO_2) et des conditions acides, toxiques pour la vie aquatique. L'importance du problème dépend des conditions et des caractéristiques des eaux affectées par le déversement.

Le soufre présent dans un cours d'eau peut avoir été déversé directement lors d'un accident ou avoir été entraîné par les eaux de ruissellement d'une aire de stockage ou encore provenir, s'il s'agit de particules, de la manutention du soufre en feuilles dans les installations portuaires (NRCC, 1977).

6.3 Toxicité pour d'autres organismes

6.3.1 Toxicité pour le bétail

Ingestion de soufre	Espèce	Résultat	Référence
170 g à 227 g	Bovins	Mort	NRCC, 1977
227 g à 397 g	Chevaux	Mort	NRCC, 1977
2 p. 100 de soufre dans les aliments	Poulets	Nocif	NRCC, 1977
45 g	Moutons	Coliques, dépression, refus de se tenir debout et un taux de mortalité de 35 p. 100	NRCC, 1977
Plantes à proximité de mines de soufre	Agneaux	Maladies par carence en cuivre	Gough, 1980

La toxicité du soufre pour les animaux provient surtout du fait qu'il provoque des diarrhées et de sa conversion partielle en sulfure d'hydrogène par des bactéries des voies digestives (NRCC, 1977).

6.3.2 Toxicité pour les plantes

Teneur en soufre	Espèce	Résultat	Référence
0,118 p. 100 à 0,154 p. 100 (S total dans matières sèches)	Sapins (aiguilles de 1 an)	Aiguilles plus lourdes des sapins les plus éloignés de la source de pollution; croissance des sapins diminue proportionnellement avec la masse des aiguilles	Zawada, 1981
200 kg/ha/an à 250 kg/ha/an (S utilisé comme fongicide)	Écosystème des plants de coton et de soya	Détérioration de la santé	Jones, 1980
740 ppm à 3420 ppm (S dans aiguilles)	Pins sylvestres (aiguilles de 1 à 3 ans)	Lésions visibles des aiguilles, érosion de leur revêtement de cire	Lehtio, 1980
700 ppm à 4250 ppm (S dans aiguilles)	Épinettes de Norvège (aiguilles de 1 à 3 ans)	Lésions visibles des aiguilles	Lehtio, 1980

6.3.3 Toxicité pour les insectes

Teneur en soufre	Espèce	Résultat	Référence
10 g par ruche	Abeilles domestiques	Létal; arrêt de la reproduction et mort progressive des abeilles	Skrypnik, 1980
5 g par ruche	Abeilles domestiques	Non toxique	Skrypnik, 1980

6.3.4 Le soufre et la vie organique. – Le soufre est un élément essentiel à la vie des animaux et des plantes et est présent dans tous les tissus. Contrairement à d'autres polluants, le soufre et ses composés existent à l'état naturel et participent au cycle de la nature. Une dose excessive de soufre dans l'alimentation de ruminants les empoisonne, parce qu'une partie du soufre se transforme en sulfure d'hydrogène dans leur rumen. Par contre, une carence en soufre provoque l'inhibition de la synthèse des protéines et un malaise général. Il est également reconnu que des quantités excessives de certains composés du soufre sont toxiques pour les plantes. Toutefois, en comparaison d'autres substances nutritives, on ne connaît pas bien son influence dans la chaîne alimentaire sol-plante-animal ou son rôle dans la nutrition et la physiologie des plantes et des arbres durant leur croissance (NRCC, 1977).

6.4 Le soufre naturel dans l'air et à la surface du sol

Le soufre naturel présent dans l'atmosphère provient de l'émission de sulfure d'hydrogène et d'autres composés soufrés par la décomposition biologique de la végétation et d'autres matières organiques sur le sol et dans les océans, ainsi que du sel des embruns marins et les particules en suspension dans l'air. On a calculé que l'émission globale de soufre d'origine biologique provenant du sol et de la mer s'élève respectivement à 62×10^6 à 110×10^6 tonnes métriques par année et à 58×10^6 à 170×10^6 tonnes métriques par année. La quantité de soufre provenant des embruns marins s'élève à 39×10^6 à 45×10^6 tonnes métriques par année (NRCC, 1977).

6.5 Dégradation du soufre

6.5.1 Environnement aquatique. – Le soufre s'oxyde rapidement en milieu aérobie. Dans l'eau aérée, qu'elle soit douce ou salée, les sédiments lacustres libéreront en général du soufre sous forme de sulfates (NRCC, 1977; Sweeny, 1980). Le soufre élémentaire peut provenir de l'utilisation du sulfure d'hydrogène dans l'eau par l'attaque bactériologique d'un certain nombre d'espèces de thiobacilles. La vitesse de l'oxydation du soufre est fonction de l'état du soufre présent (NRCC, 1977).

6.5.2 Persistance dans l'environnement. – Le soufre peut s'oxyder lentement en dioxyde de soufre en présence d'humidité (OHM-TADS, 1981).

6.6 Devenir et effets à long terme

Il n'y a aucun risque de bioconcentration ni de bio-accumulation du soufre (OHM-TADS, 1981).

6.7 Effets dans le sol

6.7.1 Dégradation dans le sol. – Le soufre naturel existe dans le sol (*a*) à l'état organique, (*b*) à l'état de sulfates solubles dans l'eau, (*c*) à l'état de sulfates adsorbés, (*d*) à l'état de sulfates insolubles (sulfates de baryum), (*e*) à l'état de sulfates insolubles coprécipités avec du carbonate de calcium et (*f*) à l'état de composés inorganiques de soufre dont l'oxydation est inférieure aux sulfates. On peut ainsi le considérer présent dans le sol à l'état organique ou à l'état inorganique. Dans les sols bien aérés, le soufre inorganique existe à l'état de sulfates qui sont principalement absorbés par la racine des plantes. Les sols imbibés d'eau ou les sols minéraux ou organiques mal aérés contiennent du soufre dont l'état ne convient pas aux plantes et qui peut atteindre des teneurs dommageables pour leur croissance. Le soufre peut s'oxyder en dioxyde de soufre, en sulfates ou peut être réduit, selon les conditions du sol (NRCC, 1977).

6.7.2 Effets sur le biote du sol. – Il a été démontré que les composés gazeux du soufre affectent certains groupes d'organismes qui vivent dans et sur le sol. Une augmentation de la teneur en soufre a réduit la population d'insectes, éliminé les vers de terre et diminué le nombre d'arraignées. Par contre, le nombre de fourmis s'est multiplié avec la dégradation du milieu (Puszkar, 1979).

Selon des études, une teneur élevée du sol en soufre résiduel réduit considérablement l'abondance des récoltes de carottes et de haricots (Pimental, 1971). Certaines plantes, comme les semis de hêtres et de chênes et les lichens, peuvent servir d'indicateurs de la présence de soufre et de métaux lourds dans l'air (Mankovska, 1981; Peterson, 1977).

7 PROTECTION DE LA SANTÉ

Le soufre élémentaire est considéré comme virtuellement non toxique. Cependant, son inhalation répétée peut irriter les muqueuses. De nombreux auteurs décrivent le soufre comme une poussière nuisible (Sax, 1979). Un contact répété peut causer des allergies (GE, 1979). Le soufre est particulièrement dangereux dans trois cas: lorsqu'il est fondu et qu'il peut occasionner des brûlures graves, lorsqu'il est à l'état de sulfure d'hydrogène résiduel à la suite des opérations de raffinage des hydrocarbures et d'élaboration du soufre et lorsqu'il est à l'état de dioxyde de soufre libéré par la combustion et des explosions causées par l'inflammation de poussières ou de vapeurs de soufre.

Les données toxicologiques qui suivent sont extraites de sources dignes de confiance et sont représentatives des valeurs publiées dans différents rapports.

7.1 Normes d'exposition recommandées

Il n'existe aucune norme d'exposition au soufre en milieu de travail. Les travaux publiés sur le soufre font état de poussières de soufre nuisibles (Sax, 1979), mais il est absent de la liste des nuisances sous forme de particules de l'American Conference of Government Industrial Hygienists (ACGIH). Cette dernière a établi pour les nuisances une TLV® de 10 mg/m^3 de poussières totales et une TLV® de 5 mg/m^3 de poussières respirables (TLV, 1983).

7.2 Données sur les propriétés irritantes

7.2.1 Contact avec la peau. – La poussière de soufre peut provoquer des irritations de la peau, de l'intérieur des paupières et des muqueuses des voies respiratoires. Le soufre peut favoriser l'obstruction des pores de la peau (Strauss, 1980). Le soufre fondu peut causer de graves brûlures. Les travaux publiés sur le soufre ne font mention d'aucune limite d'exposition au soufre élémentaire pour la peau.

7.2.2 Contact avec les yeux

Exposition	Effets	Référence
CHEZ L'HOMME		
8 ppm	Irritation	RTECS, 1979

7.3 Seuil de perception des caractères organoleptiques

Aucune donnée.

7.4 Études à long terme

7.4.1 Inhalation. – Il n'existe pas d'information sur un empoisonnement généralisé causé par l'inhalation de poussières de soufre.

7.4.2 Ingestion. – Il n'existe pas d'information sur un empoisonnement généralisé causé par l'absorption de soufre élémentaire, bien qu'on ait observé une acidose métabolique (phénomène ou le pH sanguin tend à se déplacer vers l'acidité) à la suite de l'ingestion de soufre (Blum, 1977).

7.5 Symptômes d'intoxication

Aucune référence n'a été donnée pour les symptômes de nature courante mentionnés dans la plupart des documents consultés. Seuls les symptômes ou les troubles de nature particulière ou inhabituelle sont suivis de la référence appropriée.

7.5.1 Inhalation

1. Irritation des voies respiratoires.
2. Éternuements, toux.

7.5.2 Ingestion

1. Acidose métabolique (Blum, 1977).

7.5.3 Contact avec la peau

1. Irritations cutanées.
2. Un contact répété pourrait provoquer une réaction allergique (GE, 1979).
3. Le soufre fondu cause des brûlures graves.

7.5.4 Contact avec les yeux

1. Irritation mécanique de l'intérieur des paupières.
2. Larmoiement.

7.6 Toxicité pour l'homme des produits de décomposition ou de combustion du soufre

Un des produits résiduels les plus importants de la préparation du soufre est le sulfure d'hydrogène (H_2S), et le produit principal de sa combustion est le dioxyde de soufre (SO_2).

7.6.1 Sulfure d'hydrogène et dioxyde de soufre. – Le sulfure d'hydrogène est un gaz incolore qui dégage une odeur désagréable. Présent en teneur élevée, il provoque une perte de conscience, et la mort survient par paralysie respiratoire. En teneur faible, le sulfure d'hydrogène peut endommager la cornée, causer des céphalées et des nausées et occasionner d'autres troubles du même ordre. Le sulfure d'hydrogène est particulièrement dangereux lorsqu'il est présent en teneur élevées, parce qu'il provoque une paralysie du nerf olfactif, ce qui empêche la victime de sentir la présence du produit. La TLV® du sulfure d'hydrogène a été fixée à 10 ppm pour la moyenne pondérée en fonction du temps (MPT de 8 h) et à 5 ppm pour la limite d'exposition à court terme (STEL: Short Term Exposure Limit) (TLV, 1983).

Le dioxyde de soufre est un gaz incolore qui dégage une odeur suffocante. Son inhalation irrite les muqueuses et peut produire une bronchoconstriction. La TLV® du dioxyde de soufre est de 2 ppm pour la MPT de 8 h et de 5 ppm pour la STEL (TLV, 1983).

8 COMPATIBILITÉ CHIMIQUE

8.1 Compatibilité du soufre et de divers corps chimiques

Phénomène physique ou corps chimiques	Production de chaleur	Incendie	Explosion	Formation de gaz inflammables	Polymérisation brutale	Décomposition	Formation de vapeurs toxiques	Formation de substances d'une plus grande toxicité	Augmentation de la pression dans les récipients fermés	Solubilisation	Réaction violente	Réaction non dangereuse	Remarques	Sources
Phénomène physique														
Chaleur		•					•						La poussière de soufre s'enflamme facilement et libère des vapeurs de SO_x très toxiques	Bretherick, 1979; Sax, 1979
Corps chimiques														
Acétylure de rubidium		•											Brûle en présence de soufre fondu	Bretherick, 1979
Aluminium (en poudre)	•												Réaction violente en présence de chaleur	Bretherick, 1979
Ammoniac			•										Peut former du nitrure de soufre explosif	NFPA, 1978
Anhydride chromique		•	•										S'enflamme en présence de chaleur et peut exploser	NFPA, 1978
Bore	•												Devient incandescent à 600 °C	NFPA, 1978
Calcium		•	•										Brûle dans vapeur de soufre. Réaction avec la vapeur débute à environ 480 °C. Explose si mélangé à des matières solides et enflammé	Bretherick, 1979
Carbure de baryum	•												S'enflamme habituellement	NFPA, 1978
Carbure de calcium	•												Devient incandescent en présence de vapeur de soufre à 500 °C	NFPA, 1978
Carbure de lithium		•											Brûle dans vapeur de soufre	NFPA, 1978
Carbure de sélénium	•												Devient incandescent en présence de vapeur de soufre	NFPA, 1978

Phénomène physique ou corps chimiques	Production de chaleur	Incendie	Explosion	Formation de gaz inflammables	Polymérisation brutale	Décomposition	Formation de vapeurs toxiques	Formation de substances d'une plus grande toxicité	Augmentation de la pression dans les récipients fermés	Solubilisation	Réaction violente	Réaction non dangereuse	Remarques	Sources
Carbure de strontium	•												Devient incandescent en présence de vapeur de soufre à 500 °C	NFPA, 1978
Carbure de thorium	•												Devient incandescent si chauffé à 500 °C	NFPA, 1978
Carbure d'uranium		•											S'enflamme à environ à 500 °C	Bretherick, 1979
Charbon (fraîchement) calciné ou noir de fumée)		•											Inflammation spontanée en présence de soufre en poudre	Bretherick, 1979
Chlorate de plomb		•											S'enflamme à environ 63 °C à 67 °C	NFPA, 1978
Chlorite de plomb			•											NFPA, 1978
Chlorite de sodium		•											Peut s'enflammer si humide	NFPA, 1978
Chlorure de chromyle		•											Inflammation spontanée en présence de soufre sec	NFPA, 1978
Dioxyde d'azote		•											Le soufre brûle intensément dans le dioxyde d'azote	NFPA, 1978
Dioxyde de chlore		•	•										Inflammation spontanée et possibilité d'explosion	NFPA, 1978
Dioxyde de plomb			•											NFPA, 1978
Étain	•									•				NFPA, 1978
Fluor		•											À la température ambiante	Bretherick, 1979
Hydrure de sodium										•			En présence de vapeur	Bretherick, 1979
Hypochlorite de calcium		•	•										Mélangé à du S_8 humide, produit un éclair écarlate avec projection de soufre fondu. Risque d'exploser si chauffé en vase clos	NFPA, 1978
Indium	•												Devient incandescent si chauffé	NFPA, 1978

Phénomène physique ou corps chimiques	Production de chaleur	Incendie	Explosion	Formation de gaz inflammables	Polymérisation brutale	Décomposition	Formation de vapeurs toxiques	Formation de substances d'une plus grande toxicité	Augmentation de la pression dans les récipients fermés	Solubilisation	Réaction violente	Réaction non dangereuse	Remarques	Sources
Lithium			•								•		Réaction très violente lorsqu'une des deux substances est fondue	NFPA, 1978
Monoxyde de chlore			•								•		Simple contact	NFPA, 1978
Nitrate d'ammonium			•										Peut exploser sous l'effet d'un choc	NFPA, 1978
Nitrate d'argent			•										Explose sous l'effet d'un choc	NFPA, 1978
Nitrate mercurique			•											NFPA, 1978
Nitrure de potassium		•				•							Dégage de l'ammoniac et du sulfure d'hydrogène au contact de l'eau. Si chauffé, constitue un mélange très inflammable	Bretherick, 1979
Oxyde d'argent		•											Prend feu dès qu'on le broie	NFPA, 1978
Oxyde mercurique			•								•		Explose violemment si chauffé dans une cornue	NFPA, 1978
Oxyde mercureux		•											Le mélange des substances en poudre s'enflamme au moindre choc	NFPA, 1978
Oxyde de phosphore (III)											•		Réagit violemment en présence de grandes quantités	Bretherick, 1979
Pentafluorure de brome	•	•												NFPA, 1978
Pentafluorure d'iode	•												Réaction spontanée, habituellement avec incandescence	NFPA, 1978
Pentoxyde d'iode			•										Explosif si chauffé	NFPA, 1978
Perchlorate d'ammonium			•										Sensible au chocs	NFPA, 1978
Perchlorate de potassium			•										Peut exploser sous l'effet d'un choc modéré	NFPA, 1978
Permenganate de potassium			•										Explosif si chauffé avec du soufre en poudre	NFPA, 1978
Phosphore (jaune)		•	•										Si réchauffé	Bretherick, 1979
Phosphore (rouge)	•										•		Inflammation d'un mélange intime	
Phosphure de calcium	•												Incandescent à 800 °C	NFPA, 1978

Phénomène physique ou corps chimiques	Production de chaleur	Incendie	Explosion	Formation de gaz inflammables	Polymérisation brutale	Décomposition	Formation de vapeurs toxiques	Formation de substances d'une plus grande toxicité	Augmentation de la pression dans les récipients fermés	Solubilisation	Réaction violente	Réaction non dangereuse	Remarques	Sources
Plomb-tétraphényle			•											Bretherick, 1979
Sodium			•								•			NFPA, 1978
Thorium											•			NFPA, 1978
Trifluorure de chlore		•												NFPA, 1978
Trioxyde de chrome		•	•											NFPA, 1978
Uranium	•												Si chauffé, prend feu et peut exploser Incandescent en présence de soufre en ébullition	NFPA, 1978
Catégories de corps chimiques														
Oxydants		•	•			•							Libèrent du SO_2	EPA 600/2-80-076
Réducteurs		•												EPA 600/2-80-076
Bromates			•										Si mélangés à du soufre finement divisé, explosent sous l'effet de la chaleur, d'un choc et parfois d'une légère friction (Ba, Ca, Mg, K, Na ou Zn seulement)	NFPA, 1978
Chlorates			•										Libèrent de l'oxygène et de la chaleur en explosant (Ba, Ca, Mg, K, Na ou Zn seulement)	NFPA, 1978
Hydrocarbures			•			•	•						Avec du soufre fondu, génèrent du sulfure d'hydrogène et du disulfure de carbone qui peuvent s'accumuler jusqu'à des teneurs explosives	NFPA, 1978
Iodates			•										Si mélangés à du soufre finement divisé, explosent sous l'effet de la chaleur, d'un choc et parfois d'une légère friction (Ba, Ca, Mg, K, Na ou Zn seulement)	NFPA, 1978

Phénomène physique ou corps chimiques	Production de chaleur	Incendie	Explosion	Formation de gaz inflammables	Polymérisation brutale	Décomposition	Formation de vapeurs toxiques	Formation de substances d'une plus grande toxicité	Augmentation de la pression dans les récipients fermés	Solubilisation	Réaction violente	Réaction non dangereuse	Remarques	Sources
Métaux		•	•										Par exemple, Pd, Rh, V, Os, Ni, Mg, Gd, K, Rb, Se	Bretherick, 1979
Oxydes métalliques		•	•										Par exemple, Ag_2O, NgO, Hg_2O, PbO_2, Na_2O_2, Tl_2O_3	Bretherick, 1979
Perchlorates			•										Tous les perchlorates inorganiques peuvent former avec le soufre des mélanges qui explosent sous l'effet d'un choc	NFPA, 1978

9 MESURES D'INTERVENTION ET DE SÉCURITÉ

9.1 Mesures recommandées

Les exposés qui suivent sont extraits de diverses publications. Leur formulation originale a été respectée pour éviter toute déformation de sens, et ce faisant, il a été impossible d'empêcher que n'apparaissent d'éventuels désaccords entre les sources. Toutefois, la contradiction de certaines mesures qui s'appliquent à des cas particuliers n'est qu'apparente. La mention d'une mesure ne constitue d'aucune façon une recommandation de la part d'Environnement Canada.

9.1.1 Risques d'incendie ou d'explosion. – Le soufre est un corps solide inflammable. En brûlant, il libère du dioxyde de soufre qui est un gaz toxique. À l'état liquide (fondu), le soufre réagit au contact des hydrocarbures et d'autres substances organiques en libérant du sulfure d'hydrogène, qui est toxique, et du disulfure de carbone, qui peut s'accumuler jusqu'à une teneur explosive (NFPA, 1978). Au contact de carbures et de métaux, c'est un oxydant qui réagit de façon exothermique. S'il est mélangé intimement à d'autres oxydants comme les nitrates et les chlorates, il peut devenir explosif (GE, 1979). Dispersées dans l'air, les poussières de soufre risquent d'exploser.

9.1.2 Moyens d'extinction. – Refroidir avec un jet d'eau pulvérisé les récipients touchés par le feu (ERG, 1980). Éviter d'utiliser un jet d'eau plein, susceptible d'éparpiller le soufre fondu et les poussières de soufre (NFPA, 1978).

Petit feu : Poudre chimique sèche, sable, jet d'eau pulvérisé, mousse extinctrice.

Incendie : Jet d'eau pulvérisé, jet d'eau vaporisé ou mousse extinctrice.

Retirer les récipients de la zone d'incendie si cela ne présente aucun danger. Dans le cas d'un violent incendie des marchandises, utiliser des lances ou des canons à eau télécommandés (ERG, 1980).

9.1.3 Mesures d'intervention en cas de déversements

9.1.3.1 Information générale. – Arrêter ou ralentir l'écoulement du produit si cela ne présente aucun danger. Éliminer toute source d'inflammation. Éviter tout contact du soufre fondu avec la peau et ne pas inhaler la poussière ou la vapeur de soufre.

9.1.3.2 Déversements sur le sol. – Si le soufre est déversé à l'état liquide (fondu), essayer de le contenir au moyen de barrières mécaniques ou chimiques et attendre qu'il se solidifie. Ramasser à la pelle le soufre à l'état solide (soufre fondu qui a refroidi ou soufre déjà à l'état solide) et le mettre dans des récipients munis de couvercles (faire attention à ne pas émettre de poussières) pour l'expédier dans des installations de récupération ou d'élimination (ERG, 1980; GE, 1979; EPA 670/2-75-042).

9.1.3.3 Déversements dans l'eau. – Si le soufre est déversé à l'état liquide (fondu), essayer de le contenir en profitant des poches d'eau naturelles et en utilisant des sacs de sables pour piéger le soufre au fond de l'eau. Récupérer le soufre piégé à l'aide de flexibles d'aspiration (EPA 670/2-75-042). Habituellement, le soufre fondu déversé dans l'eau s'épaissit, se solidifie et coule au fond. Toutefois, il peut arriver qu'un refroidissement trop brusque (dans une eau

très froide) le transforme en un polymère amorphe (SUDIC, 1982). S'il est impossible de retirer immédiatement le soufre de l'eau, le laisser se solidifier et le recouvrir d'un matériau de préférence inerte et basique (par exemple, la pierre à chaux) jusqu'à ce qu'on puisse le récupérer. Cela évitera la formation et la libération d'acide sulfurique dans l'eau (CG-D-56-78).

9.1.4 Nettoyage et traitement

9.1.4.1 Déversements dans l'eau. – Employer des dragues mécaniques ou aspiratrices pour enlever du fond de l'eau les masses immobilisées et les précipités de soufre (EPA 670/2-75-042).

9.1.5 Élimination du polluant. – Le soufre recueilli sur les lieux d'un déversement ne doit jamais être rejeté dans les eaux de surface ou dans un égout. Il n'est pas non plus recommandé de brûler le soufre pour l'éliminer, parce que sa combustion libère du dioxyde de soufre. Par contre, on peut recouvrir le soufre contaminé ou le mélanger à du carbonate de calcium (1 part de soufre pour 3 parts de carbonate de calcium, en poids) et l'enfouir dans une décharge pour déchets dangereux. Le carbonate de calcium neutralisera l'acide sulfurique qui pourrait être généré (GE, 1979).

9.1.6 Appareils et vêtements de protection. – Avant d'entrer dans une zone où l'on ne connaît ni le produit déversé, ni ses propriétés, il faut revêtir une combinaison entièrement étanche aux agents chimiques et porter un appareil respiratoire autonome.

S'il est certain que le produit déversé est du soufre, prendre les mesures de protection suivantes:

- Porter un appareil respiratoire autonome avec un masque complet et régulateur de débit à pneumo-commande ou à pression positive pour se protéger contre une exposition prolongée ou pour combattre un incendie. En l'absence d'un feu et si on n'a pas détecté la présence de sulfure d'hydrogène, les mesures habituelles de protection contre les poussières suffiront (Ashland MSDS).
- Le personnel de l'équipe d'intervention doit porter des lunettes anti-éclaboussures ou anti-poussières, un masque protecteur (minimum de 8 pouces), des gants et des vêtements anti-chaleur (Ashland MSDS). Des gants non résistants à la chaleur peuvent convenir lorsqu'il n'y a pas de feu ou que le soufre déversé n'est pas à l'état liquide (fondu).
- N'utiliser que des vêtements de travail décontaminés. Ne jamais porter de vêtements couverts de poussière de soufre (GE, 1979).
- Les matériaux qui conviennent le mieux aux vêtements de protection contre le soufre (EE-20) sont le butyle et le néoprène (résistance excellente).
- On doit trouver sur les lieux où il pourrait se dégager des poussières de soufre des douches oculaires automatiques et des douches d'accès facile (GE, 1979).

9.1.7 Précautions spéciales. – Entreposer le soufre dans un endroit frais, bien aéré, loin de sources de chaleur ou du feu et d'oxydants ou de réactifs. Éviter toute condition ou action susceptibles de disperser des poussières de soufre dans l'air. Il faut protéger les lieux en installant un dispositif de mise à la terre et en fournissant une humidification adéquate de l'atmosphère pour empêcher la production d'étincelles lors de la manutention du soufre en poudre. Employer des outils de sécurité anti-étincelles (GE, 1979).

10 CAS DE DÉVERSEMENT ACCIDENTEL

Le cas à l'étude est tiré d'une expérience vécue et a été inclus parce qu'il peut aider le lecteur à comprendre les mesures d'intervention prises en cas de déversement accidentel. Seuls les cas qui présentent un intérêt pour le lecteur sont exposés ci-après; le nombre de cas décrits ne traduit ni l'importance du problème ni la fréquence des déversements réels. Toute nouvelle information pertinente sera incluse dans les rééditions du manuel au fur et à mesure des progrès réalisés dans le domaine des techniques d'intervention.

10.1 Déraillement d'un train

L'exemple suivant est tiré d'une communication personnelle qui figure à l'entrée SUDIC, 1982.

Lors du déraillement d'un train, 30 des 80 wagons transportant approximativement 6000 tonnes de soufre à l'état solide ont été considérablement endommagés, et plusieurs d'entre eux commencèrent à brûler. Il fut impossible de combattre les flammes dans le cas de cinq wagons. Les pompiers arrosèrent les wagons qui brûlaient avec de l'eau pulvérisée. On se servit de terre pour éteindre de petits feux sur le sol. On fit appel à des avions-citernes pour jeter sur les principaux foyers un mélange d'eau et de phosphate de diammonium. Le panache de fumée produit par l'incendie fit l'objet d'une surveillance, et on se rendit compte qu'il se dirigeait vers une zone habitée. L'endroit fut immédiatement évacué. Une fois les flammes éteintes, on récupéra le soufre pour l'enfouir dans une décharge industrielle. Des échantillons de sol furent prélevés pour déterminer à quel point il avait été pollué et pour analyser son pH.

On a tiré les observations suivantes de cette expérience:

- Bien qu'on puisse utiliser les techniques habituelles de lutte contre les incendies, le jet d'eau vaporisé est plus efficace que le jet d'eau pulvérisé, car l'eau ne mouille pas la surface du soufre et ruisselle sans s'imbiber. Par ailleurs, la mousse est plus efficace que l'eau vaporisée.
- Comme le soufre brûle en produisant une flamme presque invisible, il est difficile de savoir à quel moment l'incendie est complètement terminé. Les pompiers doivent rester sur place pendant le nettoyage pour s'assurer que les flammes sont éteintes et pour reprendre le travail si le soufre s'enflamme de nouveau.
- La chaleur de combustion du soufre est faible; les vapeurs (dioxyde de soufre) sont donc en général plus dangereuses que la chaleur. L'équipe d'intervention doit porter un appareil respiratoire autonome et des vêtements protecteurs.
- Il est nécessaire d'effectuer la surveillance du panache de fumée au cas où une évacuation serait nécessaire.

11 IDENTIFICATION ET DOSAGE DES POLLUANTS

Les méthodes d'analyse utilisées pour l'identification et le dosage des polluants chimiques d'intérêt prioritaire sont expliquées dans les lignes qui suivent.

Les méthodes décrites et les références signalées ont été choisies en fonction d'analyses d'échantillons d'air, d'eau et de sol devant être faites dans un laboratoire de chimie doté d'un équipement standard, éloigné du lieu d'où proviennent les prélèvements. Les auteurs ont consulté les sources habituelles exposant les méthodes normalisées ou recommandées et décrit sommairement celles qui s'appliquent à chaque produit chimique. Parmi ces sources, on compte des publications du National Institute for Occupational Safety and Health des États-Unis (NIOSH), de l'Environmental Protection Agency des États-Unis (EPA), de l'American Water Works Association (AWWA), de l'American Society for Testing and Materials (ASTM) et de l'American National Standards Institute (ANSI).

Lorsque les méthodes normalisées ou recommandées ont été jugées fiables et suffisamment spécifiques pour l'analyse des échantillons provenant des matières déversées et du milieu touché, et lorsqu'elles ne nécessitaient pas un équipement de laboratoire hautement spécialisé, nous n'avons pas cherché plus loin. Enfin, lorsque nous avons découvert des tests simples et fiables, couramment utilisés dans l'industrie, nous les avons signalés. Selon le cas, il peut être nécessaire d'exercer une surveillance pour détecter toute trace de dioxyde de soufre et de sulfure d'hydrogène. Consulter les manuels de la collection «Enviroguide» pour la marche à suivre.

11.1 Identification du soufre dans l'air, l'eau et le sol

Le soufre n'est pas volatil, il est insoluble dans l'eau, et il est plus dense que l'eau; un déversement accidentel de soufre ne cause qu'une pollution de l'air ou de l'eau très localisée. Un examen visuel du lieu de l'accident permet de déterminer si du soufre y a été déversé. Le soufre à l'état solide est jaune pâle et inodore (en feuilles, granules ou boulettes), et à l'état liquide (fondu), il est jaune à orange-brun. On peut l'identifier en procédant à un essai d'inflammation. Lorsqu'on le chauffe dans un creuset, le soufre s'enflamme à faible température et brûle en formant une flamme bleu pâle et en dégageant un gaz âcre, le dioxyde de soufre (Welcher, 1955).

11.2 Dosage du soufre élémentaire dans le sol ou les sédiments (analyses quantitatives)

Après le nettoyage des lieux où s'est produit un déversement de soufre, on peut procéder à l'analyse d'échantillons de sol ou de sédiment pour y détecter du soufre à l'état de traces (Hesse, 1972). On peut adopter la méthode suivante dans le cas de teneurs en soufre du sol entre 20 ppm et 140 ppm pour un échantillon de 5 g de sol sec. Il est possible d'étendre cette gamme en faisant varier la masse de l'échantillon.

Prélever un échantillon représentatif de sol ou de sédiment. Le faire sécher sous vide sur du pentoxyde de phosphore en présence de pyrogallol alcalin. On prépare ce dernier en mélangeant une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium à 40 p. 100 avec une solution aqueuse de pyrogallol à 25 p. 100 dans une proportion de 4 pour 1. Broyer l'échantillon sec dans un mortier d'agate, et peser une partie aliquote adéquate dans un tube à centrifuger. Ajouter 25 ml d'acétone et agiter l'échantillon pendant 5 minutes. Le centrifuger ensuite à 400 tr/s pendant 15 minutes. Introduire après une portion du surnageant limpide dans une fiole jaugée de 100 ml contenant

environ 80 ml d'eau en agitant doucement. Du soufre colloïdal commence immédiatement à se former. Étendre la solution à 100 ml avec de l'eau. La mélanger et la laisser ensuite reposer pendant trois heures avant de mesurer sa densité optique à 420 nm avec un photomètre approprié. Tracer la courbe d'étalonnage à partir de mesures obtenues avec des solutions étalons. Ces étalons couvrent la gamme des teneurs en soufre de 0 $\mu g/cm^3$ à 10 $\mu g/cm^3$, et ils sont préparés avec du soufre recristallisé et de l'acétone pure redistillée.

12 RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE (REPRODUITES DE L'ANGLAIS)

12.1 Références

AMC: Astro Metallurgical Corp., Corrosion Resistance Chart for Ti, Zn, Ta, Wooster, Ohio. Not dated.

API: Alon Processing Inc., Alonized Steels for High Temperature and Corrosive Service", Tarentum, PA. Not dated.

Ashland MSDS: Ashland Oil Inc., Material Safety Data Sheet, Columbus, Ohio. Not dated.

ASS: Atlas Steel, Atlas Stainless Steels, Toronto, Ontario. Not dated.

Blum 1977: Blum, J.E., Coe, F.L., "Metabolic Acidosis After Sulphur Ingestion", New England Journal of Medicine, Vol. 297, No. 16, pp. 869-870. (1977).

Bretherick 1979: Bretherick, L., Handbook of Reactive Chemical Hazards, Second Edition, Butterworths, London, England. (1979).

CBG 1980: Southam Business Publications Ltd., "1981 Chemical Buyers' Guide", Canadian Chemical Processing, Vol. 64, No. 9, Don Mills, Ontario. (December, 1980).

CCPA 1982: Canadian Chemical Producers' Association, Private Communication, Ottawa, Ontario. (1982).

CDS 1967: National Association of Corrosion Engineers, Corrosion Data Survey, Houston, Texas. (1967).

CE 1978: Krienberg, M., "Handling Molten Sulphur", Chemical Engineering, McGraw-Hill Book Company, New York, New York, pp. 125-126. (December 4, 1978).

CE 1980: Kirby, G.N., "How to Select Materials", Chemical Engineering, McGraw-Hill Book Company, New York, New York, pp. 87-131. (November 3, 1980).

CELC 1980: Good, D.R., Doering, R.L., Compendium of Environmental Law in Canada 1980, Vols. 1 & 2, D.R. Good Publishing Services, Ottawa, Canada. (1980).

CG-D-56-78: Hand, T.D. et al., A Feasibility Study of Response Techniques for Discharges of Hazardous Chemicals that Sink, U.S. Coast Guard, Washington, D.C., CG-D-56-78. (June, 1978).

CHRIS 1978: U.S. Department of Transportation, Coast Guard, Chemical Hazards Response Information System (CHRIS), Washington, D.C. (1978).

CLC 1974: Association of American Railroads, The Car and Locomotive Cyclopedia of American Practices, Published by Simmons-Boardman, Omaha, Nebraska. (1974).

Corpus 1982: Corpus Information Services Ltd., "Sulphur", Chemical Product Profiles, Don Mills, Ontario. (15 June 1982).

CMI 1980: Annual Review of the Canadian Mineral Industry 1980, Department of Energy, Mines & Resources. (1980).

Cotton 1972: Cotton, F.A., Wilkinson, G., Advanced Inorganic Chemistry, Interscience Publishers, New York. (1972).

CRC 1957: Hodgman, C.D. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 39th Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland Ohio, (1957).

CRC 1980: Weast, R.C. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 60th Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, Ohio. (1980).

CRC 1982: Weast, R.C. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 61th Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, Ohio. (1982).

DCRG 1972: Dow Chemical Company, Dow Chemical Resistance Guide for Dow Plastic Lined Piping Products, Midland, Michigan. (1972).

DNACP 1979: Directory of North American Chemical Producers, Chemical Information Sources Ltd., Oceanside, New York. (1978/79).

Doc. TLV 1980: American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), Documentation of Threshold Limit Values, Fourth Edition, Cincinnati, Ohio. (1980).

DPPED 1967: DOM-X, DOM-X Plastic Pipe Engineering Data, Toronto, Ontario. (1967).

EE-20: Buchan, Lawton, Parent Ltd., A Survey of Self-Contained Breathing Apparatus and Totally-Encapsulated Chemical Protection Suits, Unedited Version. Not dated.

EPA 600/2-80-076: Hatayama, H.K., Chen, J.J., deVera, E.R., Stephens, R.D., Storm, D.L., A Method for Determining the Compatibility of Hazardous Wastes, Municipal Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. (April, 1980).

EPA 670/2-75-042: Pilie, R.J. et al., Methods to Treat, Control and Monitor Spilled Hazardous Materials, U.S. Environmental Protection Agency, National Environmental Research Center, Cincinnati, Ohio, EPA 670/2-75-042. (June, 1975).

ERG 1980: U.S. Department of Transportation, Hazardous Materials, 1980 Emergency Response Guidebook, U.S. Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, Materials Transportation Bureau, Washington, D.C. (1980).

FMT: Futura Metal Technology, Corrosion Data Sheet, West Lake Village, CA. Not dated.

GAC: Gale Alloy Corp., Corrosion Resistance Data for Non-Magnetic SS-Catalog No. 1280, Amityville, N.Y. Not dated.

GE 1979: General Electric Company, Material Safety Data Sheets, Material Safety Information Services, Schenectady, New York. (October, 1979).

GF: GF Plastic Systems Inc., GF Plastic Systems, Santa Ana, California. Not dated.

Gough 1980: Gough, L.P., Shacklette, H.T., Case, A.A., Elemental Concentrations Toxic to Plants, Animals, and Man, U.S. Department of Interior, Washington, D.C., pp. 46-48. (1980).

GPP: Uniroyal, Guide to Polymer Properties, Uniroyal Inc., Mishawaka, Indiana. Not dated.

Hesse 1972: Hesse, P.R., A Textbook of Soil Chemical Analysis, Chemical Publishing Co. Inc., New York, New York, p. 326. (1972).

HIS 1969: Hydraulic Institute, Hydraulic Institute Standards, 12th Edition, New York, New York. (1969).

JANAF 1971: Stull, D.R., Prophet, H., JANAF Thermochemical Tables, Second Edition, Office of Standard Reference Data, U.S. National Bureau of Standards, Washington, D.C. (June, 1971).

Jones 1980: Jones, U.S., Tuarez, E.L., "Impact of Atmospheric Sulphur Deposition on Agroecosystems", Environ. Impact Health Eff., Second Proceedings of Life Science Symposium, pp. 337-396. (1980).

JSSV 1979: Jenkins Brothers, Jenkins Corrosion Resistant Stainless Steel Valves, New York, New York. (1979).

Kirk-Othmer 1979: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Third Edition, Vol. 22, John Wiley & Sons, New York. (1979).

Lange's Handbook 1979: Dean, J.A. (ed.), Lange's Handbook of Chemistry, 12th Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, New York. (1979).

Lehtio 1980: Lehtio, H., Tuutilainen, J., Jantunen, M., "Visible Injuries and Sulphur Contents of the Needles of *Pi us sylvestris* and *Picea abies* in the City of Kuopio and Around Two Factories in Central Finland", Ann. Bot. Fenn., Vol. 17, No. 1, pp. 1-6. (1980).

Mankovska 1981: Mankovska, B., "Contamination of Beech and Oak by Magnesium, Sulphur, Fluorine, Lead, Cadmium and Zinc Near Magnesite Works", Biologia (Bratislava), Vol. 36, No. 7, pp. 489-496. (1981).

MCA 1959: Manufacturing Chemists Association, Sulphur, Washington, D.C. (1959).

Meyer 1965: Meyer, B. (ed.), Elemental Sulphur, Chemistry and Physics, University of Washington, John Wiley & Sons Inc., New York, New York. (1965).

Meyer 1977: Meyer, E., Chemistry of Hazardous Materials, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. (1977).

MWPP 1978: Rehau, Mechan-O-Joint Water Pressure Pipe and Fittings, Montreal, Quebec. (1978).

NBS 1982: National Bureau of Standards, The NBS Tables of Chemical Thermodynamic Properties, Washington, D.C. (1982).

NFPA 1978: National Fire Protection Association, Fire Protection Guide on Hazardous Materials, Seventh Edition, Boston, Massachussetts. (1978).

NRC 1981: National Research Council, Prudent Practices for Handling Chemicals in Laboratories, National Academy Press, Washington, D.C. (1981).

* NRCC 1977: National Research Council of Canada, Sulphur and Its Inorganic Derivatives in the Canadian Environment, NRCC No. 15015, Ottawa, Canada. (1977).

OHM-TADS 1981: Oil and Hazardous Materials Technical Assistance Data System, U.S. Environmental Protection Agency, Oil and Special Materials Control Division, Office of Water Program Operations, Washington, D.C. (1981).

Ontario E.P. Act 1971: Ontario Ministry of the Environment, "The Environmental Protection Act, Statutes of Ontario 1971", Chapter 86, as amended; and Regulation 15 (General) as amended. (1971).

Orchard 1982: Orchard, D., "Safety in Sulphur Handling", Canadian Chemical Processing, Vol. 66, No. 1, pp. 34-39. (19 February 1982).

ORER 1983: The Official Railway Equipment Register, Interstate Commerce Commission and Canadian Transport Commission, published by R.E.R. Publishing Corporation, New York, New York. (1983).

PB 216658: U.S. Department of the Interior, Federal Water Pollution Control Administration, Oil & Hazardous Material. Emergency Procedures in the Water Environment, Edison, New Jersey, CWR 10-1, PB 216658 (NTIS 18). (October, 1968).

Personal Communication SUDIC 1982: Personal Communication, Sulphur Development Institute of Canada, Calgary, Alberta. (June 11, 1982).

Peterson 1977: Peterson, W.L., Douglas, G.W., "Air Quality Monitoring with a Lichen Network: Baseline Data", Environmental Research Monograph, No.5, Syncrude Canada Ltd., Edmonton, Alberta. (1977).

Pimental 1971: Pimental, D., Ecological Effects of Pesticides on Non Target Species, Presidential Report, Office of Science and Technology. (June, 1971).

Puszkar 1979: Puszkar, T., "Changes in Epigeal Predatory Fauna in an Area Exposed to Emissions from the Sulphur Mine at Jeziorko Near Tarnobrzeg, Poland", Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. Sci. Biol., Vol. 27, No. 6, pp. 481-485. (1979).

Rosenstock 1977: Rosenstock, H.M., Draxl, K., Steiner, B., Herron, J.T., Energetics of Gaseous Ions, National Bureau of Standards, Washington, D.C. (1977).

* RTDCR 1974: Regulations for the Transportation of Dangerous Commodities by Rail, Canadian Transport Commission, Published by Supply and Services Canada, Ottawa, Ontario. (1974).

RTECS 1979: Lewis, R.J., Tatken, R.L., Registry of Toxic Effects of Chemical Substances, 1979, Vols.1 and 2, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Cincinnati, Ohio. (September, 1980).

Sax 1979: Sax, N.I., Dangerous Properties of Industrial Materials, Fifth Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York, New York. (1979).

SFC: Standard Fittings Co., Corrosion Resistance Chart, Opelousas, LA. (June, 1982).

* Disponible en français.

Shell 1982: Shell Canada Resources Ltd., Handling Guide for Molten Sulphur Tank Cars, Calgary, Alberta. (1982).

Shreve 1977: Shreve, R.N., Brink, J.A., Chemical Process Industries, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, New York. (1977).

Skrypnik 1980: Skrypnik, E.I., Artemenko, L.P., Shatenkov, I.S., "Safe and Toxic Doses of Sulphur for Bees", Tekhnol. Proizvod. Prod. Pchelovod., pp. 207-209. (1980).

Strauss 1978: Strauss, J.S., Goldman, P.H., Nacht, S., Gans, E.H., "A Reexamination of the Potential Comedogenicity of Sulphur", Arch. Dermatol., Vol. 114, No. 9, pp. 1340-1342. (September, 1978).

Streeter 1971: Streeter, V.L., Fluid Mechanics, Fifth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, New York. (1971).

SUDIC 1983: Private Communication, Sulphur Development Institute of Canada, Calgary, Alberta. (January 28, 1983).

Sweeney 1980: Sweeney, R.E., Kalil, E.K., Kaplan, I.R., "Characterization of Domestic and Industrial Sewage in Southern California Coastal Sediments Using Nitrogen, Carbon, Sulphur and Uranium Tracers", Marine Environment Research, Vol. 3, No. 3, pp. 225-243. (1980).

TCM 1979: General American Transportation Corporation, Tank Car Manual, Chicago, Illinois. (May, 1979).

TDGC 1980: Transport Canada, Transportation of Dangerous Goods Code, Vol. 1 (Lists), Vol. 2, Ottawa, Ontario. (June, 1980).

TLV 1983: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, TLV•s Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents in the Workroom Environment with Intended Changes for 1983-84, Cincinnati, Ohio. (1983).

TPS 1978: GSR Fluid Handling, Thermoplastic Piping Systems, Sun Valley, California. (1978).

Welcher 1955: Welcher, F.J., Hain, R.B., Semimicro Qualitative Analysis, D. Van Nostrand Co. Inc., Princeton, New Jersey, p. 468. (1955).

WQC 1963: McKee, J.E., Wolf, H.W., Water Quality Criteria, Second Edition, Resources Agency of California, State Water Quality Control Board. (1963).

* WQS 1979: McNeily, R.N., Neimans, V.P., Dwyer, L., Water Quality Sourcebook: A Guide to Water Quality Parameters, Inland Waters Directorate, Water Quality Branch, Environment Canada, Ottawa. (1979).

Zawada 1981: Zawada, J., Widera, S., "Sulphur Content in Needles as a Possible Cause of Fir Regression", Sylwan, Vol. 124, No. 7, pp. 63-66. (1981).

• Disponible en français.

12.2 Bibliographie

Alon Processing Inc., Alonized Steel for High Temperature and Corrosive Service, Tarentum, PA. Not dated.

*Annual Review of the Canadian Mineral Industry 1980, Department of Energy, Mines and Resources. (1980).

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), Documentation of Threshold Limit Values, Fourth Edition, Cincinnati, Ohio. (1980).

American Conference of Governmental Industrial Hygienists, TLV*s Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents in the Workroom Environment with Intended Changes for 1983-84, Cincinnati, Ohio. (1983).

Ashland Oil Inc., Material Safety Data Sheet, Columbus, Ohio. Not dated.

Association of American Railroads, The Car and Locomotive Cyclopedia of American Practices, Published by Simmons-Boardman, Omaha, Nebraska. (1974).

Astro Metallurgical Corp., Corrosion Resistance Chart for Ti, Zn, Ta, Wooster, Ohio. Not dated.

Atlas Steel, Atlas Stainless Steels, Toronto, Ontario. Not dated.

Blum, J.E., Coe, F.L., "Metabolic Acidosis After Sulphur Ingestion", New England Journal of Medicine, Vol. 297, No. 16, pp. 869-870. (1977).

Bretherick, L., Handbook of Reactive Chemical Hazards, Second Edition, Butterworths, London, England. (1979).

Buchan, Lawton, Parent Ltd., A Survey of Self-Contained Breathing Apparatus and Totally-Encapsulated Chemical Protection Suits, Unedited Version. Not dated.

Canadian Chemical Producers' Association, Private Communication, Ottawa, Ontario. (1982).

*Canadian Transport Commission, Regulations for the Transportation of Dangerous Commodites by Rail, Published by Supply and Services Canada, Ottawa, Ontario. (1974).

Corpus Information Services Ltd., "Sulphur", Chemical Product Profiles, Don Mills, Ontario. (15 June 1981).

Cotton, F.A., Wilkinson, G., Advanced Inorganic Chemistry, Interscience Publishers, New York, New York. (1972).

Dean, J.A. (ed.), Lange's Handbook of Chemistry, 12th Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, New York. (1979).

Directory of North American Chemical Producers, Chemical Information Sources Ltd., Oceanside, New York. (1978/79).

* Disponible en français.

DOM-X, DOM-X Plastic Pipe Engineering Data, Toronto, Ontario. (1967).

Dow Chemical Company, Dow Chemical Resistance Guide for Dow Plastic Lined Piping Products, Midland, Michigan. (1972).

Futura Metal Technology, Corrosion Data Sheet, West Lake Village, CA. Not dated.

Gale Alloy Corp., Corrosion Resistance Data for Non-Magnetic SS-Catalog No. 1280, Amityville, N.Y. Not dated.

General American Transportation Corporation, Tank Car Manual, Chicago, Illinois. (May, 1979).

General Electric Company, Material Safety Data Sheets, Material Safety Information Services, Schenectady, New York. (October, 1979).

GF Plastic Systems Inc., GF Plastic Systems, Santa Ana, California. Not dated.

Good, D.R., Doering, R.L., Compendium of Environmental Law in Canada 1980, Vols. 1 & 2, D.R. Good Publishing Services, Ottawa, Canada. (1980).

Gough, L.P., Shacklette, H.T., Case, A.A., Elemental Concentrations Toxic to Plants, Animals, and Man, U.S. Department of Interior, Washington, D.C., pp. 46-48. (1980).

GSR Fluid Handling, Thermoplastic Piping Systems, Sun Valley, California. (1978).

Hand, T.D. et al., A Feasibility Study of Response Techniques for Discharges of Hazardous Chemicals that Sink, U.S. Coast Guard, Washington, D.C., CG-D-56-78. (June, 1978).

Hatayama, H.K., Chen, J.J., deVera, E.R., Stephens, R.D., Storm, D.L., A Method for Determining the Compatibility of Hazardous Wastes, Municipal Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. (April, 1980).

Hesse, P.R., A Textbook of Soil Chemical Analysis, Chemical Publishing Co. Inc., New York, New York, p. 326. (1972).

Hodgman, C.D. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 39th Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, Ohio. (1957).

Hydraulic Institute, Hydraulic Institute Standards, 12th Edition, New York, New York. (1969).

Interstate Commerce Commission and Canadian Transport Commission, The Official Railway Equipment Register, Published by R.E.R. Publishing Corporation, New York, New York. (1983).

Jenkins Brothers, Jenkins Corrosion Resistant Stainless Steel Valves, New York, New York. (1979).

Jones, U.S., Tuarez, E.L., "Impact of Atmospheric Sulphur Deposition on Agroeco-systems", Environ. Impact Health Eff., Second Proceedings of Life Science Symposium, pp. 337-396. (1980).

Kirby, G.N., "How to Select Materials", Chemical Engineering, McGraw-Hill Book Company, New York, New York, pp. 87-131. (November 3, 1980).

Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Third Edition, Vol. 22, John Wiley & Sons, New York. (1979).

Krienberg, M., "Handling Molten Sulphur", Chemical Engineering, McGraw-Hill Book Company, New York, New York, pp. 125-126. (December 4, 1978).

Lehtio, H., Tuutilainen, J., Jantunen, M., "Visible Injuries and Sulphur Contents of the Needles of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* in the City of Kuopio and Around Two Factories in Central Finland", Ann. Bot. Fenn., Vol. 17, No. 1, pp. 1-6. (1980).

Lewis, R.J., Tatken, R.L., Registry of Toxic Effects of Chemical Substances, 1979, Vols. 1 and 2, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Cincinnati, Ohio. (September, 1980).

Mankovska, B., "Contamination of Beech and Oak by Magnesium, Sulphur, Fluorine, Lead, Cadmium and Zinc Near Magnesite Works", Biologia (Bratislava), Vol. 36, No. 7, pp. 489-496. (1981).

Manufacturing Chemists Association, Sulphur, Washington, D.C. (1959).

McKee, J.E., Wolf, H.W., Water Quality Criteria, Second Edition, Resources Agency of California, State Water Quality Control Board. (1963).

* McNeily, R.N., Neimans, V.P., Dwyer, L., Water Quality Sourcebook: A Guide to Water Quality Parameters, Inland Waters Directorate, Water Quality Branch, Environment Canada, Ottawa. (1979).

Meyer, B. (ed.), Elemental Sulphur, Chemistry and Physics, University of Washington, John Wiley & Sons Inc., New York, New York. (1965).

Meyer, E., Chemistry of Hazardous Materials, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1977).

National Association of Corrosion Engineers, Corrosion Data Survey, Houston, Texas. (1967).

National Bureau of Standards, The NBS Tables of Chemical Thermodynamic Properties, Washington, D.C. (1982).

National Fire Protection Association, Fire Protection Guide on Hazardous Materials, Seventh Edition, Boston, Massachussetts. (1978).

National Research Council, Prudent Practices for Handling Chemicals in Laboratories, National Academy Press, Washington, D.C. (1981).

* National Research Council of Canada, Sulphur and Its Inorganic Derivatives in the Canadian Environment, NRCC No. 15015, Ottawa, Canada. (1977).

* Disponible en français.

Oil and Hazardous Materials Technical Assistance Data System, U.S. Environmental Protection Agency, Oil and Special Materials Control Division, Office of Water Program Operations, Washington, D.C. (1981).

Ontario Ministry of the Environment, "The Environmental Protection Act, Statutes of Ontario 1971", Chapter 86, as amended; and Regulation 15 (General) as amended. (1971).

Orchard, D., "Safety in Sulphur Handling", Canadian Chemical Processing, Vol. 66, No. 1, pp. 34-39. (19 February 1982).

Personal Communication, Sulphur Development Institute of Canada, Calgary, Alberta. (June 11, 1982).

Peterson, W.L., Douglas, G.W., "Air Quality Monitoring with a Lichen Network: Baseline Data", Environmental Research Monograph, No.5, Syncrude Canada Ltd., Edmonton, Alberta. (1977).

Pilie, R.J. et al., Methods to Treat, Control and Monitor Spilled Hazardous Materials, U.S. Environmental Protection Agency, National Environmental Research Center, Cincinnati, Ohio, EPA 670/2-75-042. (June, 1975).

Pimental, D., Ecological Effects of Pesticides on Non Target Species, Presidential Report, Office of Science and Technology. (June, 1971).

Puszkar, T., "Changes in Epigeal Predatory Fauna in an Area Exposed to Emissions from the Sulphur Mine at Jeziorko Near Tarnobrzeg, Poland", Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. Sci. Biol., Vol. 27, No. 6, pp. 481-485. (1979).

Rehau, Mechan-O-Joint Water Pressure Pipe and Fittings, Montreal, Quebec. (1978).

Rosenstock, H.M., Draxl, K., Steiner, B., Herron, J.T., Energetics of Gaseous Ions, National Bureau of Standards, Washington, D.C. (1977).

Sax, N.I., Dangerous Properties of Industrial Materials, Fifth Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York, New York. (1979).

Shell Canada Resources Ltd., Handling Guide for Molten Sulphur Tank Cars, Calgary, Alberta. (1982).

Shreve, R.N., Brink, J.A., Chemical Process Industries, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, New York. (1977).

Skrypnik, E.I., Artemenko, L.P., Shatenkov, I.S., "Safe and Toxic Doses of Sulphur for Bees", Tekhnol. Proizvod. Prod. Pchelovod., pp. 207-209. (1980).

Southam Business Publications Ltd., "1981 Chemical Buyers' Guide", Canadian Chemical Processing, Vol. 64, No. 9, Don Mills, Ontario. (December, 1980).

Standard Fittings Company, Corrosion Resistance Chart, Opelousas, LA. (June, 1982).

Strauss, J.S., Goldman, P.H., Nacht, S., Gans, E.H., "A Reexamination of the Potential Comedogenicity of Sulphur", Arch. Dermatol., Vol. 114, No. 9, pp. 340-1342. (September, 1978).

Streeter, V.L., Fluid Mechanics, Fifth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, New York. (1971).

Stull, D.R., Prophet, H., JANAF Thermochemical Tables, Second Edition, Office of Standard Reference Data, U.S. National Bureau of Standards, Washington, D.C. (June, 1971).

Sulphur Development Institute of Canada, Private Communication, Calgary, Alberta. (June 11, 1982).

Sulphur Development Institute of Canada, Private Communication, Calgary, Alberta. (January 28, 1983).

Sweeney, R.E., Kalil, E.K., Kaplan, I.R., "Characterization of Domestic and Industrial Sewage in Southern California Coastal Sediments Using Nitrogen, Carbon, Sulphur and Uranium Tracers", Marine Environment Research, Vol. 3, No. 3, pp. 225-243. (1980).

Transport Canada, Transportation of Dangerous Goods Code, Vol. 1 (Lists), Vol. 2, Ottawa, Ontario. (June, 1980).

Uniroyal, Guide to Polymer Properties, Uniroyal Inc., Mishawaka, Indiana. Not dated.

U.S. Department of the Interior, Federal Water Pollution Control Administration, Oil & Hazardous Materials. Emergency Procedures in the Water Environment, Edison, New Jersey, CWR 10-1, PB 216658 (NTIS 18). (October, 1968).

U.S. Department of Transportation, Hazardous Materials, 1980 Emergency Response Guidebook, U.S. Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, Materials Transportation Bureau, Washington, D.C. (1980).

U.S. Department of Transportation, Coast Guard, Chemical Hazards Response Information System (CHRIS), Washington, D.C. (1978).

Weast, R.C. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 60th Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, Ohio. (1980).

Weast, R.C. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 61st Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, Ohio. (1982).

Welcher, F.J., Hain, R.B., Semimicro Qualitative Analysis, D. Van Nostrand Co. Inc., Princeton, New Jersey, p. 468. (1955).

Zawada, J., Widera, S., "Sulphur Content in Needles as a Possible Cause of Fir Regression", Sylwan, Vol. 124, No. 7, pp. 63-66. (1981).